



Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Energétique

Présenté par :

DAHOUM Amina

Thème

EFFET DE LA TURBULENCE SUR UNE EOLIENNE

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
AMIRAT Bekacem	MCB	Président
ZERGANE Said	MCA	Encadreur
HEBICHE Noureddine Anouar	MAA	Examinateur

Année Universitaire : 2019 / 2020

N° d'ordre : GM/...../2020

Remerciements

Tout d'abord je remercie ALLAH le Bon dieu, le Compatissant, de m'avoir donné la foi et le courage de mener à bien ce projet.

Je voudrais adresser mes sincères remerciements à mon superviseur, Dr. ZERGANE Said, cela m'a aidé à terminer ce travail.

J'adresse mes remerciements et ma gratitude au chef du département de mécanique, Mansour Rokbi

Un grand merci aussi à mes parents qui nous ont donné la lumière et les conseils

Je tiens à exprimer ma gratitude à tous ceux qui ont contribué, directement ou indirectement à l'incarnation de ce travail.

Je remercie également tous les enseignants du département de mécanique qui ont contribué à ma formation.

Mes sincères remerciements à tous les membres du jury qui ont accepté de se prononcer sur ce point action.

Enfin, je tiens à exprimer ma gratitude à tous.

Résumé

ملخص

العمل المقدم يتناول موضوع الرياح على قسمين. القسم الاول يتضمن اقتراح نموذج اعقاب لإيشيهارا الذي ياخذ بعين الاعتبار الاضطراب المتعلق بطبيعة الارضية و وجود الحواجز في محطة الرياح. باستعمال خصائص و معطيات التربينه GAMESA G52, القسم الثاني يركز على بحث اثر الاضطراب على طاقة التربينه. النتائج المتحصل عليها اثبتت أن هذه الظاهرة تؤثر كثيرا الطاقة المنتجة.

كلمات مفتاحية : نموذج أعقاب, طاقة الرياح, الاضطراب, ايشيهارا, GAMESA G52.

Résumé

Le travail présenté porte sur le vent en deux parties. La première partie consiste à proposer un modèle de sillage d'Ishihara qui tient en compte la turbulence liée à l'état du sol et à la présence des obstacles dans un parc éolien. En utilisant les données et les caractéristiques de la turbine GAMESA G52, La deuxième partie se concentre sur l'investigation de l'effet de la turbulence sur la puissance d'une éolienne. Les résultats obtenus ont montrés que ce phénomène influe significativement la puissance développée.

Mots clés : Modèles de sillage, Énergie éolienne, Turbulence, Ishihara, GAMESA G52.

Abstract

The work presented concerns the wind in two parts. The first part consists in proposing a model of Ishihara's wake that takes into account the turbulence linked to the state of the ground and the presence of obstacles in a wind farm. Using data and characteristics from the GAMESA G52 turbine, Part II focuses on investigating the effect of turbulence on the power of a wind turbine. The results obtained showed that this phenomenon significantly influences the power developed.

Keywords: Wake models, Wind energy, Turbulence, Ishihara. GAMESA G52

Tables des matières

Remerciements	i
Résumé.....	ii
Chapitre 1 Généralités sur le vent.....	01
Introduction.....	01
1.1. Le vent.....	02
1.1.1. Définition.....	02
1.1.2. Les vents dominants.....	03
1.1.3. Les vents saisonniers.....	04
1.1.4. Les vents locaux.....	04
1.2. Principe de formation du vent.....	05
1.3. Mesure du vent.....	05
1.4. Echelles du vent.....	05
1.5. Types de vents.....	08
1.5.1. Vent réel.....	08
1.5.2. Vent vitesse ou vent relatif.....	09
1.5.3. Vent apparent.....	09
1.5.4. Cas particuliers.....	09
1.6. Les caractéristiques du vent.....	09
1.6.1. Caractéristiques du vent essentielles au fonctionnement des éoliennes.....	09
1.6.1.1. Vitesse moyenne du vent	10
1.6.1.2. Distribution du vent.....	10
1.6.1.3. Le gradient.....	10
1.7. Les effets du vent.....	10
1.7.1. Effet sillage.....	10
1.7.2. Effets accélérateurs « effet de tunnel ».....	11
1.7.3. Effets accélérateurs « effet de colline ».....	11

Chapitre 2 La turbulence de l'écoulement du vent.....	13
Introduction.....	13
2.1. Vitesses du vent.....	15
2.1.1 Vitesse moyenne et vitesse rafale.....	16
2.2. La turbulence.....	17
2.2.1. Origines et propriétés.....	18
2.2.2. Turbulence d'origine mécanique.....	19
2.2.3. Turbulence d'origine thermique ou convective.....	20
2.3. La turbulence dans un parc éolien.....	21
2.3.1. Modèle d-Ishihara.....	22
2.3.2. Turbulence liée au vent dans le sillage.....	22
Chapitre 3 Effet de la turbulence du vent.....	26
Introduction.....	26
3.1. Effet de la turbulence.....	28
3.1.1. Effet de la turbulence ambiante.....	28
3.1.2. Effet de la turbulence ajoutée.....	30
3.1.3. Effet de la turbulence ambiante sur la turbulence ajoutée.....	31
3.1.4. Effet de la turbulence générée sur la puissance.....	32
Conclusion.....	35
Référence.....	36

Chapitre 1

Généralités sur le vent

Introduction

Le vent est le mouvement au sein de l'atmosphère d'une masse de gaz située à la surface d'une planète, ces vents sont globalement provoqués par un réchauffement inégalement réparti à la surface de la planète provenant du rayonnement stellaire (énergie solaire) et par la rotation de la planète. Sur terre, ce déplacement est essentiel à l'explication de tous les phénomènes météorologique [1]. Le vent est mécaniquement décrit par les lois de la dynamique des fluides, comme les courants marins il existe un inter dépendance entre ces deux circulations de fluides. Les vents sont généralement classifiés selon leur ampleur spatiale, leur vitesse, leur localisation géographique, le type de force qui les produit et leurs effets. La vitesse du vent est mesurée avec un anémomètre mais peut être estimée par une manche à air, un drapeau, etc.

Le vent est l'acteur principal de l'oxygénation des océans ainsi que des lacs de haute montagne, par agitation et mise en mouvement de leurs surfaces. Il permet le déplacement de nombreux agents organiques et minéraux et d'expliquer la formation de certaines roches sédimentaires. Il influence le déplacement des populations d'insectes volants, la migration des oiseaux, il façonne la forme des plantes et participe à la reproduction de certains végétaux.

L'érosion éolienne participe parfois à la morphologie du relief local. Le vent à inspirer dans les civilisations humaines de nombreuses myologies. Il a influé sur les transports, voire les guerres d'énergie pour le travail purement mécaniques, et pour l'électricité. Il participe même aux loisirs.

1.1. Le vent

1.1.1 Définition

Le vent correspond au déplacement d'une masse d'air consécutif des différences locales de température et de pression entre deux zones (Fig. I.1). D'une légère brise à une forte tempête, la vitesse et l'amplitude géographique des vents peuvent être très variables dans l'espace et dans le temps parfois destructeur. Le vent participe à de nombreux processus sur terre, comme l'oxygénation des océans et des rivières, ou l'érosion des sols et le déplacement de minéraux, l'homme l'utilise aujourd'hui comme source d'énergie telle que l'énergie éolienne [2].

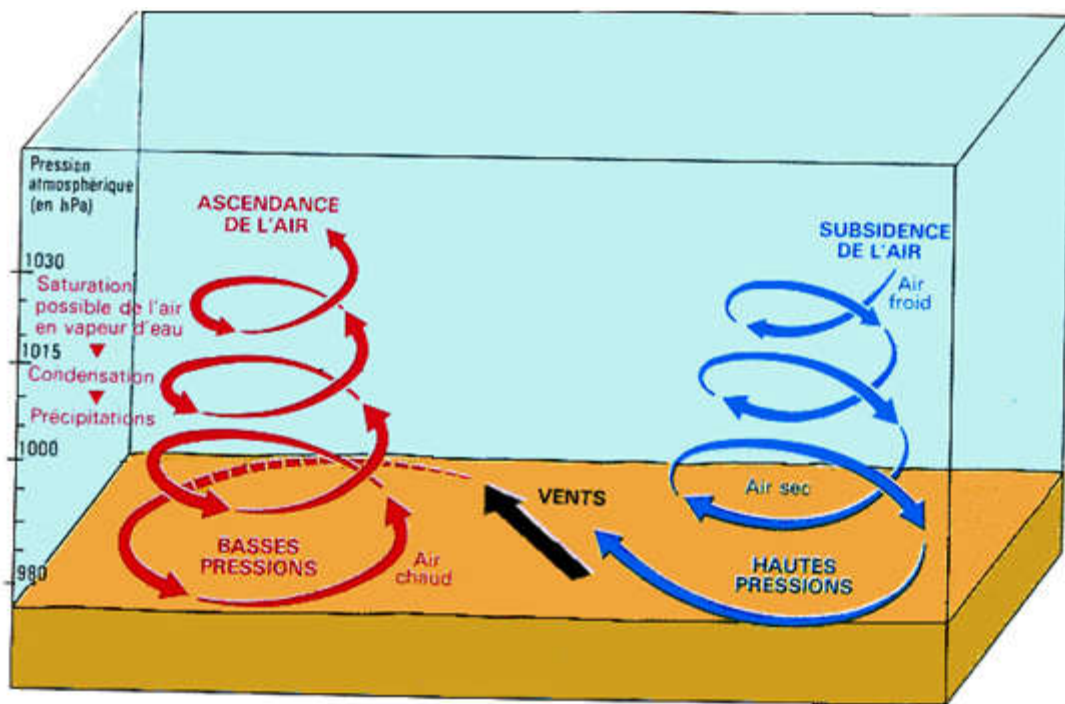


Fig. I.1 Origine du vent

C'est de l'air en mouvement peut être dit autrement. Le terme est généralement appliqué aux déplacements naturels horizontaux de l'atmosphère ; les mouvements de direction verticale ou presque verticale sont des courants. Les vents sont produits par les différences de pression atmosphérique engendrées principalement par les différences de

température. Les variations dans la distribution des pressions et des températures sont dues essentiellement à une distribution inégale de l'énergie solaire reçue à la surface de la Terre, et aux différences dans les propriétés thermiques des surfaces des continents et des océans. Quand les températures de régions voisines deviennent inégales, l'air le plus chaud tend à s'élever et à s'écouler par-dessus l'air le plus froid et le plus lourd. La direction des vents générés de cette façon est généralement grandement modifiée par la force de Coriolis résultant de la rotation de la Terre [3].

Il existe quatre sortes de vents : les vents dominants, les vents saisonniers, les vents locaux, et les vents cycloniques et anticycloniques.

1.1.2. Les vent dominants

Près de l'équateur se trouve une zone de basses pressions, connue sous le nom de zone des calmes équatoriaux, qui se situe approximativement entre 10° de latitude Nord et 10° de latitude Sud. À l'intérieur de cette «ceinture équatoriale», l'air est chaud et lourd. À 30° de l'équateur, dans les deux hémisphères, on trouve la zone des calmes tropicaux ou «ceintures subtropicales», qui sont des zones de hautes pressions, où les vents sont faibles et variables. Les vents créés par la différence de pression existant entre les ceintures subtropicales et la ceinture équatoriale sont appelés les vents alizés ou les alizés ; ce sont les vents dominants des basses latitudes. Dans l'hémisphère Nord, le vent soufflant du nord vers l'équateur est dévié vers l'ouest par la rotation de la Terre. Dans l'hémisphère Sud, le vent soufflant du sud est dévié de la même façon vers l'est (Fig. I1.2).

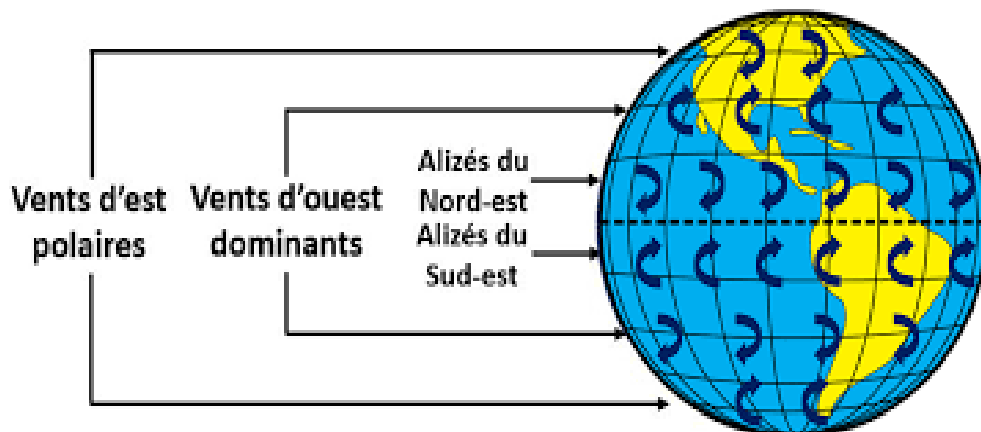


Fig. I.2 Vents dominants sur le globe terrestre

Les vents dominants d'ouest aux latitudes moyennes sont très affectés par des perturbations atmosphériques cycloniques et anticycloniques qui modifient radicalement leur direction de jour en jour.

Les régions polaires les plus froides ont tendance à être des centres de hautes pressions, particulièrement dans l'hémisphère Sud, et les vents venant de ces zones sont déviés et deviennent les vents polaires d'est. Le vent le plus rapide n'ayant jamais été mesuré de façon certaine à la surface de la Terre soufflait à 362 km/h. Il a été enregistré sur le mont Washington, dans le New Hampshire, aux États-Unis, le 12 avril 1934. Des vents considérablement plus forts, cependant, soufflent près du centre des tornades.

Plus les vents dominants d'ouest s'élèvent au-dessus de la surface de la Terre, plus leur vitesse augmente, et plus ils s'étendent en latitude entre l'équateur et le pôle. Les alizés et les vents polaires d'est soufflent donc à une altitude relativement basse, et sont remplacés par les vents d'ouest à une altitude de quelques milliers de mètres. Les vents d'ouest les plus forts soufflent à des altitudes comprises entre 10 et 20 km, et ils ont tendance à se concentrer dans une ceinture relativement étroite, appelée le courant jet, où ils soufflent à des vitesses allant jusqu'à 550 km/h.

1.1.3. Les vents saisonniers

Les masses d'air qui se trouvent au-dessus des continents sont plus chaudes l'été et plus froides l'hiver que les masses d'air situées au-dessus des océans voisins. En été, les continents deviennent des zones de basses pressions, avec des vents provenant des océans plus froids. En hiver, les continents deviennent des zones de hautes pressions, avec des vents dirigés vers les océans plus chauds. Les moussons de la mer de Chine et de l'océan Indien sont des vents saisonniers

1.1.4. Les vents locaux

De la même façon qu'il existe des variations saisonnières de température et de pression au-dessus des continents et des océans, on observe des changements quotidiens qui ont des effets similaires, mais plus localisés. En été, en particulier, la terre est plus chaude que la mer dans la journée, et plus froide la nuit. Les variations de pression ainsi provoquées génèrent un système de brises dirigées vers la terre pendant la journée et vers la mer pendant la nuit. Ces brises de terre et de mer font subir leur influence jusqu'à environ 50 km des côtes. Le même

phénomène se produit en montagne et engendre les brises de montagne et de vallée. D'autres vents sont dus à des phénomènes locaux : ainsi les tourbillons et les vents associés aux orages.

1.2. Principe de formation du vent

Deux paramètres principaux contribuent à la formation des vents à la surface de la terre : la température et la pression. Par exemple, lorsqu'une masse d'air se réchauffe, elle s'élève en altitude au-dessus des couches plus froides, ce qui génère une diminution de la pression. Pour combler le vide, la masse d'air voisine va s'espace laissé vacant (ce mouvement crée le vent). Un exemple concret (celui de la brise de mer et la brise de terre). Le jour, la terre se réchauffe plus vite que la mer. L'air au-dessus de la terre s'élève et crée une dépression, compensée par l'air surplombant la mer, générant ainsi une brise qui circule de la mer vers le continent. À l'inverse, la nuit, l'eau conserve mieux sa chaleur et l'air de la terre se refroidit plus vite. Cette différence thermique génère un courant d'air de la terre vers la mer (une brise de terre).

La rotation de la terre sur elle-même contribue également à la formation des vents, à leur localisation et à leur orientation, par la force de Coriolis. À cela, il faut également rajouter la topographie des continents qui peut favoriser les rencontres entre les masses d'air.

1.3. Mesure du vent :

La vitesse du vent se mesure à l'aide d'un anémomètre. À travers ces vitesses, des échelles ont été établies afin d'estimer l'intensité des vents, dont cite l'échelle de Beaufort, l'échelle de Foudjia. L'échelle de Beaufort s'étale de 0 à 12. Elle repose sur la vitesse moyenne des vents sur une durée de 10 minutes, utilisée en association avec l'état de la mer qui en découle. Au niveau 0, le vent est nul, tandis qu'au niveau 12, les vents d'un ouragan soufflent à plus de 118 km/h, générant une mer déchainée, alors que l'échelle de Foujita se limite quant à elle à la classification des tornades, phénomène climatique générant les vents les plus violents à l'échelle de la terre, mais sur une petite zone géographique.

1.4. Échelles du vent

Plusieurs échelles de classification des vents existent, la plus commune est celle de Beaufort utilisée par les marins (Fig. I.3). Celle-ci est une échelle de mesure empirique, comportant 13 degrés (de 0 à 12), de la vitesse moyenne du vent sur une durée de dix minutes utilisée dans les milieux maritimes. Initialement, le degré Beaufort correspond à un état de la mer associé à une « fourchette » de la vitesse moyenne du vent. Même si, de nos jours, cette vitesse peut être mesurée avec une bonne précision à l'aide d'un anémomètre, il reste

commode, en mer, d'estimer cette vitesse par la seule observation des effets du vent sur la surface de la mer.

ÉCHELLE DE BEAUFORT

Force	Terme	Km/h	Kts	Descriptions
0	Calme	< 1	< 1	La fumée monte verticalement
1	Très légère brise	1 à 5	1 à 3	La fumée indique la direction du vent – les girouettes ne s'orientent pas
2	Légère brise	6 à 11	4 à 6	On sent le vent sur le visage – les feuilles bougent
3	Petite brise	12 à 19	7 à 10	Les drapeaux flottent bien – les feuilles sont sans cesse en mouvement
4	Jolie brise	20 à 28	11 à 15	Les poussières s'envolent – les petites branches plient
5	Bonne brise	29 à 38	16 à 20	Les petits arbres balancent – les sommets de tous les arbres sont agités
6	Vent frais	39 à 49	21 à 26	On entend siffler le vent
7	Grand frais	50 à 61	27 à 33	Tous les arbres s'agitent
8	Coup de vent	62 à 74	34 à 40	Quelques branches cassent
9	Fort coup de vent	75 à 88	41 à 47	Le vent peut endommager les bâtiments
10	Tempête	89 à 102	48 à 55	Visibilité Réduite – gros dégâts
11	Violente tempête	103 à 117	56 à 63	Conditions exceptionnelles – visibilité réduite – gros dégâts
12	Ouragan	> 118	> 64	Dommage maximum

Fig. I.3 Echelle de Beaufort

L'échelle de Fujita est une échelle de classement de la force des tornades selon les dommages causés. Elle est utilisée aux États-Unis pour remplacer l'échelle originale de Fujita depuis la saison estivale 2007. Elle a été développée pour pallier les faiblesses notées dans l'échelle originale qui montraient des incertitudes quant à la force des vents nécessaires pour causer certains dommages et à l'évaluation de situations similaires mais ayant affecté des constructions de différentes solidités (Fig. I.4).

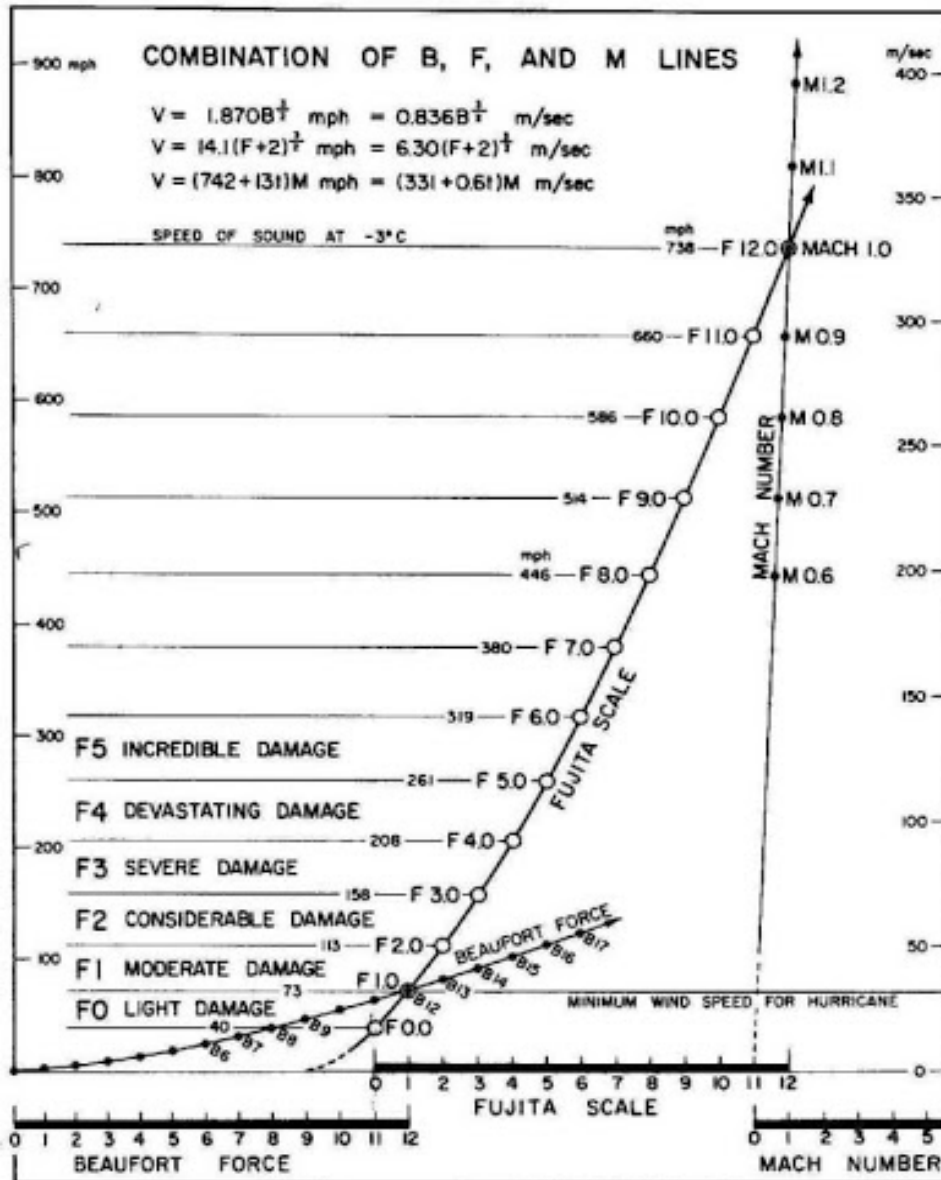


Fig. I.4 Echelle de Foujita

Finalement, l'échelle de Saffir-Simpson pour les cyclones tropicaux, nommés « ouragans », se formant dans l'hémisphère ouest, qui inclut les bassins cycloniques de l'océan Atlantique et l'océan Pacifique nord à l'est de la ligne de changement de date. Elle est graduée en cinq niveaux d'intensité, correspondant à des intervalles de vitesses de vents normalisés. Pour classer un cyclone sur cette échelle, la vitesse des vents soutenus est enregistrée pendant une minute à une hauteur de 10 mètres (33 pieds), la moyenne ainsi obtenue est comparée aux intervalles (Voir les catégories d'intensité) (Fig. I.5).

ECHELLE DE SAFFIR-SIMPSON		
DEPRESSION et TEMPETE TROPICALES		
Classification	Vitesse des vents soutenus	
Dépression tropicale	Moins de 34 nœuds	
Tempête tropicale	Entre 34 et 63 nœuds	
CYCLONE TROPICAL		
Classification	Pression au centre	Vitesse des vents soutenus
Catégorie 1	Plus de 980 hPa	Entre 64 et 82 nœuds
Catégorie 2	Entre 979 et 965 hPa	Entre 83 et 95 nœuds
Catégorie 3	Entre 964 et 945 hPa	Entre 96 et 113 nœuds
Catégorie 4	Entre 944 et 920 hPa	Entre 114 et 134 nœuds
Catégorie 5	919 hPa et moins	135 nœuds et +

Fig. I.5 Echelle de Saffir-Simpson

1.5. Types de vents :

Comprendre des 3 types de vents : Vent réel, vitesse, apparent ;

Lorsqu'un véhicule ou une personne se déplace, le vent ressenti au cours du déplacement peut être très différent du vent généré par les conditions météorologiques avec des conséquences parfois importantes, on distingue :

1.5.1 Vent réel

Le vent qui est ressenti par un observateur immobile par rapport au sol : il est dû uniquement au déplacement de l'air autour de celui-ci. Sa direction et sa force peuvent être lues sur un instrument fixé sur le lieu où l'observateur se situe : ces valeurs sont théoriquement celles communiquées par les bulletins météorologiques (avec une fiabilité variable). Le qualificatif de « réel » est utilisé quand l'observateur se situe à bord d'un engin se déplaçant (avion, voilier...) pour le différencier d'autres composantes du vent engendré par le déplacement : vent apparent ou le vent dû à la vitesse. Ce vent a une composante moyenne à laquelle s'ajoutent souvent des rafales, soit des hausses soudaines et temporaires de sa vitesse.

1.5.2. Vent vitesse ou vent relatif :

Le vent généré par le seul déplacement de l'observateur, égal en intensité, de même direction, et opposé en sens, à la vitesse relative de celui-ci. Il est d'autant plus fort que la vitesse de déplacement est élevée. C'est par exemple le vent que l'on ressent lorsque l'on se déplace à vélo, en l'absence de tout vent réel

1.5.3. Vent apparent (pour la navigation maritime) :

Le vent tel qu'il est ressenti par l'observateur en déplacement, somme vectorielle des deux précédents, c'est-à-dire du vent réel et du vent vitesse (ou relatif). La notion de vent apparent est surtout utilisée en voile ou en char à voile : en effet, le vent ressenti sur le bateau dépendra non seulement du vent réel, mais également de la vitesse du bateau, ce qui conduit à devoir ajuster le réglage des voiles. C'est le vent que reçoit effectivement la voile.

1.5.4. Cas particuliers :

Vents locaux à travers le Monde. Ces vents sont généralement créés par des échauffements de terrain ou des effets montagneux.

La force de Coriolis s'exerce sur de longues distances ; elle est nulle à l'équateur et maximale aux pôles. Dans certaines situations, le déplacement d'air ne s'exerce pas sur une distance suffisante pour que cette force ait une influence notable. Le vent est alors causé seulement par le différentiel de pression, le frottement et la force centrifuge. Voici quelques cas qui se produisent lorsque la circulation générale des vents est nulle, très faible ou quand on doit tenir compte d'effets locaux.

1.6. Les caractéristiques du vent

1.6.1. Caractéristiques du vent essentielles au fonctionnement des éoliennes

Cette partie présente les caractéristiques principale du vent et en particulier celles qui sont déterminantes pour ouvrir un site éolien .le vent est une ressource inépuisable, gratuite et disponible partout. La qualité du vent est un des critères essentiels pris en compte en amont d'un projet de pose d'éolienne. Les caractéristiques du vent sont étudiées sur le site sur lequel les éoliennes doivent être installées, à une hauteur qui correspond à celle des éoliennes, sur un période minimum de 2 ans, ces deux ans permettent d'avoir des mesures justes : cela modère les effets de saisons ainsi que les variations d'une année à l'autre. Deux critères sont étudiés avec Sion : la vitesse moyenne du vent et sa régularité.

1.6.1.1. Vitesse moyenne du vent :

Les mesures sont tout d'abord relevées toutes les 10 minutes. La moyenne du vent est alors calculée sur une période 10 minutes : il s'agit de la vitesse météorologique. la vitesse météorologique est ensuite calculée sur une longue période (en général 2 ans). La moyenne de ces vitesses météorologique donne la vitesse moyenne du vent. Un très bon site a un vent ayant comme vitesse moyenne 8m/s. A partir de 6m/s on considère le site comme mauvais.

1.6.1.2. Distribution du vent :

La distribution du vent est également un critère important car elle varie suivante la hauteur et dans le temps. Un vent stable, proche de sa vitesse moyenne n'a pas les même conséquences sur les éolienne qu'un vent irrégulier qui subite des pics, des turbulences. Les turbulences sont la première cause de fatigue des éoliennes. Par exemple, la vallée du Rhône n'est pas une région à éolienne : soit il n'y a du mistral vent trop fort pour les éoliennes. Au voisinage d'un obstacle ou du sol le vent perd de sa puissance. Il est donc important de faire les mesures à la hauteur des pales. Les variations de de la vitesse du vent sur un site donné sont décrites sur un graphique nommé « la distribution de Weibull ». Ce graphique construit à partir des mesures de la vitesse moyenne du vent prises toutes les 10 minutes ; les valeurs obtenues sont réparties en différentes vitesse de vent. Il faut ensuite dessiner la courbe de la fonction de probabilité de densité de Weibull dont le but est de refléter la probabilité d'avoir une vitesse particulière. L'aire sous la courbe entre deux vitesses de vent correspond à la probabilité que le vent souffle entre ces deux vitesses.

1.6.1.3. Le gradient :

La variation à un instant donné de la composante horizontale de la vitesse du vent à la verticale du point d'observation s'appelle le gradient vertical de la vitesse du vent. Il est important d'avoir un site homogène.

1.7. Les effets de vent

1.7.1. Effet sillage

Etant donné qu'une éolienne transforme l'énergie du vent en électricité, le vent abandonnant l'hélice doit forcément avoir une capacité énergétique plus basse que le vent arrivant à l'éolienne. Ceci est une conséquence directe du fait que l'énergie ne se crée, ni ne se consume. Si vous ne trouvez pas cette explication assez claire, vous devez étudier la

définition d'énergie que vous trouverez dans notre manuel de référence. Une éolienne va toujours créer un effet d'abri dans la direction du vent en poupe. En fait, il y aura toujours un sillage derrière l'éolienne, c'est-à-dire une longue traînée de vent qui est bien plus turbulente et ralentie que le vent devant le rotor (l'expression effet désilage est naturellement dérivée du sillage qui se crée derrière la quille d'un bateau). Comme vous voyez sur l'image, il est en effet possible de voir le sillage derrière une éolienne si l'on ajoute de la fumée à l'air passant à travers du rotor. L'éolienne sur l'image a d'ailleurs été construite de façon à tourner dans le sens inverse des aiguilles d'une montre ce qui est une construction très rare pour les éoliennes modernes.

Dans les parcs éoliens, on espace en général les éoliennes d'une distance équivalente à trois fois le diamètre du rotor au minimum, afin d'éviter que la turbulence engendrée derrière chaque éolienne n'affecte trop la production énergétique des éoliennes situées plus en aval. la distance entre les éoliennes est souvent encore plus grande dans la direction des vents dominants.

1.7.2. Effets accélérateurs « L'effet de tunnel »

En utilisant une pompe de bicyclette ordinaire (il suffit de laisser la souris désigner la pompe sur l'écran, sans cliquer dessus), vous verrez que la vitesse de l'air abandonnant la valve est bien plus élevée que la vitesse du mouvement du piston. Ce phénomène est évidemment dû au fait que la valve est beaucoup plus étroite que le cylindre de la pompe.

Cela implique que, bien que la vitesse normale dans un terrain dégagé soit de, disons, 6 mètres par seconde, elle atteindra facilement 9 mètres par seconde dans un couloir naturel.

L'installation d'une éolienne dans un tel tunnel est donc une façon intelligente d'obtenir une vitesse de vent supérieure à celle de la zone ambiante. Cependant, afin d'obtenir un effet de tunnel utilisable, le tunnel doit être enclavé de pentes douces. Si les collines entourant le tunnel sont très rugueuses et accidentées, il peut y avoir beaucoup de turbulence dans le vent, ce qui fait que le vent change de vitesse et de direction sans cesse et très rapidement. Trop de turbulence risque non seulement d'annuler complètement l'avantage obtenu par une vitesse de vent accélérée, mais aussi d'augmenter l'usure sur l'éolienne.

1.7.3. Effets accélérateurs « effet de colline »

En général, on cherche à installer les éoliennes sur une colline ou une chaîne de hauteurs qui sont plus élevées que le paysage environnant. Surtout, il faut de préférence avoir une vue

aussi dégagée que possible dans la direction des vents dominants. Si l'on rencontre souvent des vitesses de vent accélérées sur les collines, c'est à cause de la différence de pression existant à l'avant et à l'arrière de celles-ci. Ainsi, le vent se trouve comprimé par la colline à la face exposée au vent, pour s'étendre ensuite, une fois passé le sommet, vers la zone de basse pression du côté sous le vent de la colline.

Comme vous voyez sur l'image, le vent commence à dévier bien avant qu'il n'arrive à la colline. Ce phénomène est dû à l'étendue assez considérable de la zone de haute pression se trouvant à l'avant de la colline. Notez également que le vent devient très turbulent en traversant le rotor de l'éolienne. Tout comme c'était le cas pour l'effet de tunnel, une colline accidentée ou à pentes raides peut provoquer de fortes turbulences ce qui risque d'annuler l'avantage que l'on compte normalement gagner par une accélération de la vitesse.

Chapitre 2

La turbulence de l'écoulement du vent

Introduction

La composante horizontale du déplacement de l'air en un point donné et à un instant donné se dispose selon une certaine direction ; elle atteint en outre une vitesse déterminée appelée vitesse du vent, que l'on mesure généralement en mètres par seconde ou en kilomètres par heure (km/h), mais aussi en nœuds ou milles par heure. Spécialement en météorologie marine et en météorologie aéronautique ; en effet le mille nautique est dans ces branches de la météorologie une unité bien représentative, puisqu'il exprime la distance séparant sur la surface de la sphère terrestre deux points d'un même méridien dont la latitude diffère d'une minute d'angle [7].

La représentation imagée de la vitesse du vent s'accommode bien de l'emploi quelquefois nuancé ou combiné d'une série d'adjectifs tels que "léger", "modéré" ou "fort" (Fig. 2.1).

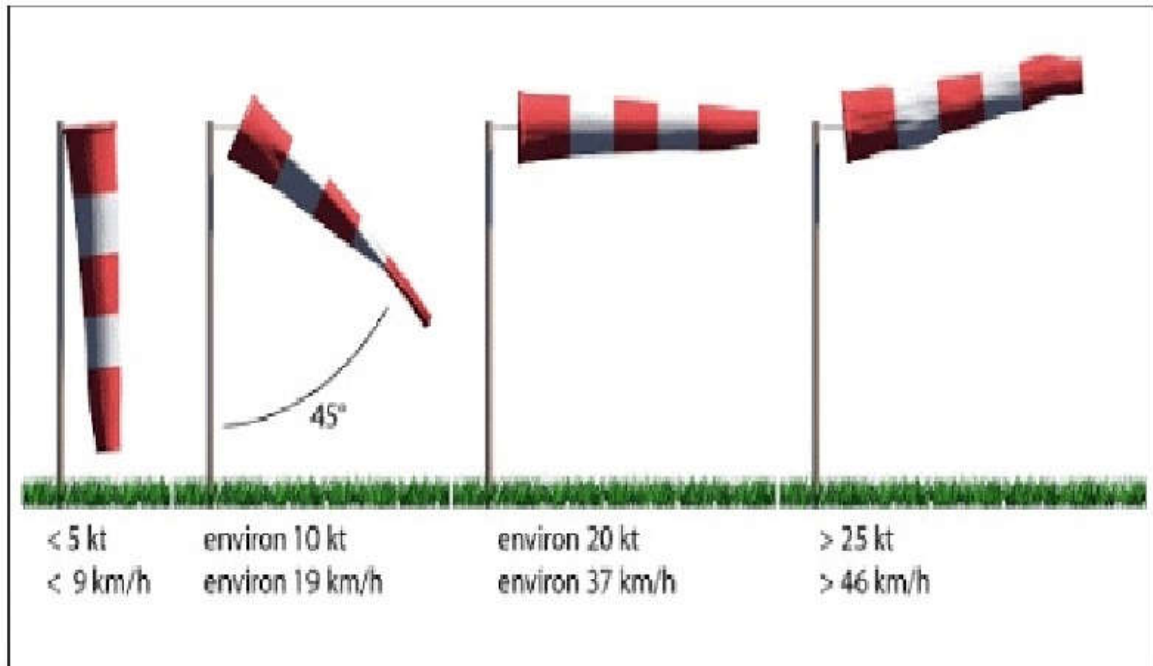


Fig. 2.1 Qualité de la vitesse du vent

Au point que les bulletins météorologiques font tout naturellement un usage courant de telles descriptions. Cette médaille a toutefois un triple revers. En premier lieu, et pour des raisons de moindre turbulence en mer comme de pratique professionnelle, la sensibilité à la force du vent est moins marquée chez les marins que chez les gens du continent, ce qui tend à décaler vers des estimations plus basses les échelles de spécifications empiriques utilisées en météorologie marine par rapport à celles qui s'appliquent à l'intérieur des terres. Puis, les coutumes et les langues ayant pu imprégner l'histoire des différents services météorologiques nationaux font qu'il n'existe pas de correspondance bien établie d'un pays à l'autre quant à ces spécifications.

Enfin, plus la puissance des rafales apparaissent importante et plus le choix d'une estimation ne tend à se déplacer vers le haut dans l'échelle de référence. Toutes ces difficultés expliquent que les qualifications du vent ne puissent prétendre à une valeur normative et servent simplement à donner aux destinataires des bulletins météorologiques parfois en fonction de leurs besoins spécifiques une idée de l'intensité avec laquelle souffle le vent.

2.1. Vitesses du vent

Lorsqu'on parle de "vitesse" du vent, il faut porter attention au fait que la valeur numérique de la vitesse de déplacement horizontal de l'air subit dans la plupart des cas des variations avec le temps qui sont très fréquentes et parfois très amples. Autour de la moyenne temporelle de cette valeur en un site donné oscille alors sans cesse une succession rapide de chutes de vitesse et de rafales, qui ôtent toute représentativité à la donnée d'une mesure dès lors qu'elle s'effectue à un instant unique, isolé (seuls sont susceptibles de faire exception des flux d'air très réguliers). En raison de cette grande variabilité, la vitesse du vent doit donc être appréhendée de trois points de vue différents :

- celui de la vitesse instantanée du vent. Celle-ci correspond à une approche purement cinématique de la vitesse, s'appuyant sur des représentations quasi infinitésimales de l'espace (le point) et du temps (l'instant). Elle est fournie pratiquement sur un site donné par chacune des mesures qu'y effectue l'anémomètre au cours de très brefs intervalles de temps successifs (une fois toutes les demi-secondes, par exemple).
- celui de la vitesse moyenne du vent, entendue dans le premier des sens qu'aborde l'article du même nom dans la météo de A à Z, et donc considérée comme la moyenne arithmétique sur un long intervalle de temps (10 minutes, par exemple) des nombreuses vitesses instantanées du vent mesurées sur le site durant cet intervalle. Seule une telle valeur numérique directement calculée par l'anémomètre permet de passer d'une définition simplement cinématique à une définition utilisable en mécanique des fluides : le vent y devient l'une des propriétés quantitatives d'une parcelle d'air correspondant à une certaine échelle spatio-temporelle, dépendante de la densité du réseau de mesure ou de prévision du vent et de la fréquence des mesures ou des prévisions qui y sont effectuées.
- celui enfin de la vitesse maximale du vent. Celle-ci est mesurée dans le même intervalle de temps que la vitesse moyenne dont nous venons de parler : elle fournit la plus élevée des vitesses de pointe atteintes par les rafales ayant pu être enregistrées durant cet intervalle ; son intérêt est d'autant plus grand qu'elle donne une idée concrète du degré de turbulence du vent.

Des actions que son souffle est capable de susciter et donc, parfois, des dégâts qui peuvent en résulter (les actions que produit le vent, en effet, dépendent souvent moins de sa vitesse moyenne que de la brutalité de ses rafales, lesquelles il est vrai, ont tendance à croître en

intensité avec sa force). Rappelons à ce sujet qu'une rafale, pour être enregistrée comme telle, doit excéder certains seuils minimaux d'écart à la vitesse moyenne et de durée.

2.1.1. Vitesse moyenne et vitesse de rafale

Le fait que la valeur de la vitesse du vent normalement utilisée en météorologie est celle de sa vitesse moyenne au sens précisé plus haut rend synonymes en ce domaine les termes "vitesse du vent" et "vitesse moyenne du vent", sauf à préciser explicitement une définition différente pour la vitesse du vent. C'est ainsi que les valeurs limites appliquées aux seuils de la force du vent ou aux régimes des vents tropicaux (de la simple dépression aux plus puissants cyclones) se réfèrent toujours à cette vitesse moyenne. Cependant, la description du temps sensible observé ou prévu peut exiger que l'on adjoigne à ces valeurs celles qu'ont atteintes ou atteindront les vitesses maximales du vent au cours de la même échéance (toutes les 3 heures, ou toutes les demi-journées, par exemple), ces dernières étant alors fournies soit par une fourchette d'ordre de grandeur comme ce l'est très souvent pour la vitesse moyenne désignée par la grandeur \bar{U} (Fig. 2.2).

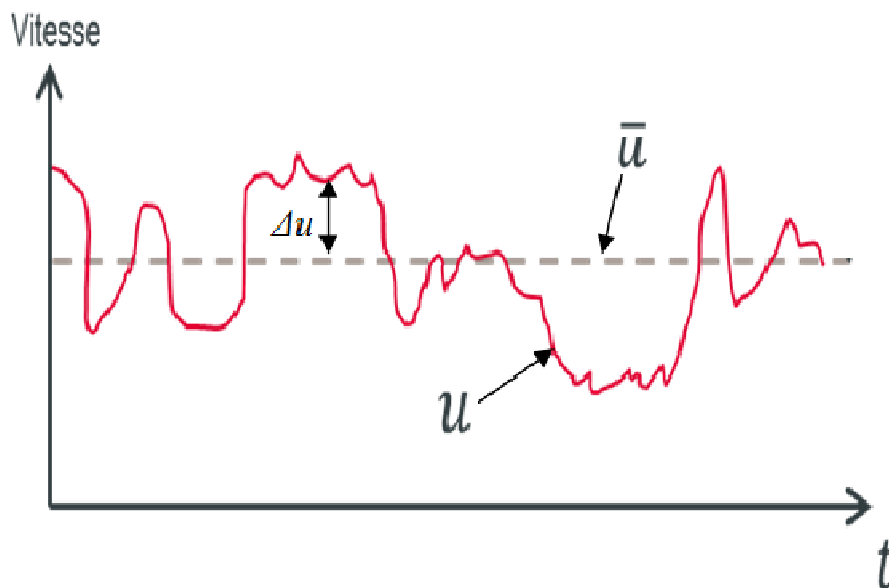


Fig. 2.2 Fluctuation et grandeur moyenne de la vitesse du vent

soit par leur valeur la plus élevée : et bien que le prévisionniste procure les valeurs des deux catégories de vitesse du vent (quand il est possible et nécessaire de les distinguer), il n'est pas rare que l'une d'entre elles seulement soit transmise ou comprise par les personnes qui reçoivent directement ou indirectement ce type de données ; or, les rafales, comme on le

sait, peuvent dépasser parfois jusqu'à plus de moitié les moyennes acquises par le vent. Il est donc important de spécifier ou de savoir si une valeur présentée comme étant celle de la vitesse du vent figure réellement sa vitesse "en moyenne" ou bien sa vitesse "par rafales". Généralement, la vitesse du vent sur un site venté est standardisée par la vitesse moyenne annuelle U ou \bar{u} , alors, la vitesse instantanée u se décompose selon la relation suivante :

$$u = U + \Delta u \quad (2.1)$$

Où Δu est la partie fluctuante de la vitesse du vent.

2.2. La turbulence

La turbulence désigne l'état de l'écoulement d'un fluide, liquide ou gaz, dans lequel la vitesse présente en tout point un caractère tourbillonnaire : tourbillons dont la taille, la localisation et l'orientation varient constamment. Les écoulements turbulents se caractérisent donc par une apparence très désordonnée, un comportement difficilement prévisible et l'existence de nombreuse échelle spatiale et temporelle (Fig. 2.3).

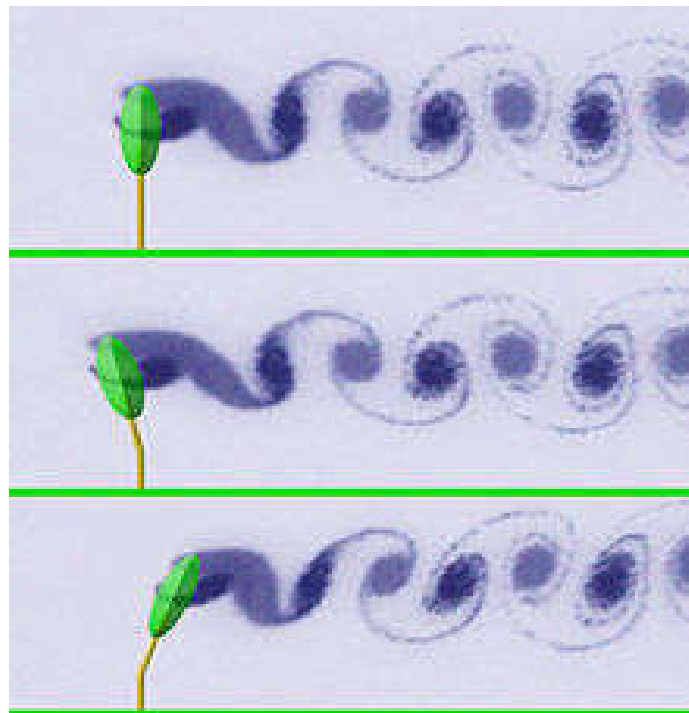
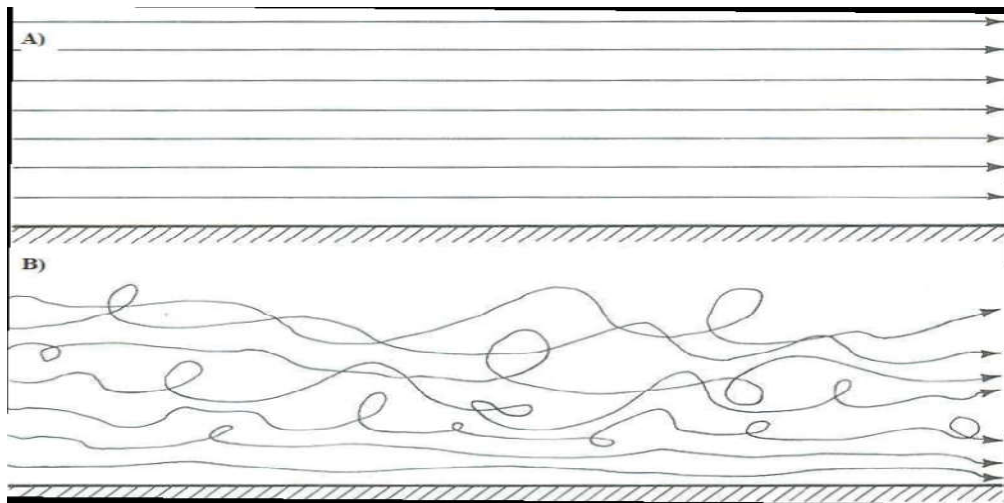


Fig. 2.3 La turbulence dans le vent après un obstacle

De tels écoulements apparaissent lorsque la source d'énergie cinétique qui met le fluide en mouvement est relativement intense devant les faces de viscosité que le fluide oppose pour se

déplacer. À l'inverse, on appelle laminaire le caractère d'un écoulement régulier [8]. La turbulence désigne des mouvements aléatoires de l'air se superposant au mouvement moyen [9]. La turbulence caractérise la majorité des fluides géophysiques. En milieu fluvial, on assiste au phénomène de la turbulence créée par la présence d'une paroi qui se représente par le lit et les berges de la rivière. Dans ce type d'écoulement, les parcelles de fluide se déplacent irrégulièrement avec une vitesse empreinte d'importantes fluctuations. On associe les fluctuations de vitesse aux tourbillons qui composent l'écoulement et qui constituent un volume



de fluide avec un mouvement de rotation. Les tourbillons possèdent des tailles et des durées variées dont les grandeurs s'étendent de la viscosité à la profondeur de l'écoulement [10] (Fig. 2.4).

Fig. 2.4 Ecoulement laminaire (A) et écoulement turbulent (B)

2.2.1. Origines et propriétés

La turbulence est un état particulier d'un liquide ou d'un gaz. En aéronautique, elle est quantifiée par de variation plus ou moins rapides et intense des mouvements aléatoires d'un aéronef. En physique du fluide, la turbulence est opposée à l'état laminaire qui caractérise des mouvements réguliers des éléments du fluide lors de son écoulement. Quelle que soit son origine [10], la turbulence montre trois caractères inaliénables :

- La turbulence diffusive : Elle a tendance à mélange et fluide ainsi le rendre homogène.
- La turbulence dissipative : L'énergie qui anime les tourbillons est dissipée sous forme de chaleur à l'échelle moléculaire par les forces de viscosité.

- La turbulence aléatoire : S'elle est possible les résoudre Les équation de Navier Stokes à l'échelle moléculaire, il est impossible de connaître avec précision l'état initial l'atmosphère. Par conséquent l'estimation de l'état du fluide à un temps donné est déférente de l'état réel par propagation de petite perturbation.

Les origines de la turbulence sont principalement de nature dynamique ou thermique. La turbulence d'origine dynamique provient d'instabilités générées par une variation de vitesse de l'écoulement dans une direction donnée. Ce processus est le cisaillement. Plus le cisaillement est intense, plus la production de mouvements turbulents est élevée. Le cisaillement du vent est la principale source génératrice de turbulence en condition de stratification stable.

2.2.2. Turbulence d'origine mécanique

Se divise en deux selon leurs origines

- **Turbulence de frottement** interaction à surface terrestre et le vent dans la couche limite de surface (CLS) entre SFC et 150ft. Elle ne se manifeste donc que dans les très basses couches.
- **Turbulence d'écoulement** résultat du frottement de la viscosité à l'intérieur d'une même tranche ; ou entre deux tranches atmosphériques de caractéristiques différentes en termes d'écoulement. Elle intéresse toute l'atmosphère et se décline sous de multiples formes :
 - Turbulence orographique et ondes de relief
 - Turbulence en air clair (CAT) due aux jets
 - Turbulence près des surfaces frontales : due au contraste thermique des masses d'air ; au cisaillement horizontal ; ainsi qu'aux mouvements verticaux induits.
 - Turbulence due à une forte inversion thermique : le refroidissement crée une bulle d'air calme en surface. La force de frottement étant réduite, l'air glisse sur cette bulle et vers le sommet de l'inversion, la vitesse du vent peut-être plus d'une fois et demi supérieure à la vitesse du vent géostrophique, créant ainsi du cisaillement.
 - Turbulence due aux brises : le vent de directions quasiment opposées entre le sol et le sommet de la circulation de brise, qui se situe généralement vers 1000ft.
 - Turbulence de sillage : la turbulence aérodynamique créée par les tourbillons de l'avion.
 - Turbulence de sillage nuageux : générée par un cumulonimbus (CB).

2.2.3. Turbulence d'origine thermique ou convective

- Le nuage convectifs : plus l'activité convective est importante, plus forte est la turbulence. La turbulence se manifeste aussi bien dans le nuage convectif qu'au-dessus, autour et en-dessous (Fig. 2.5)

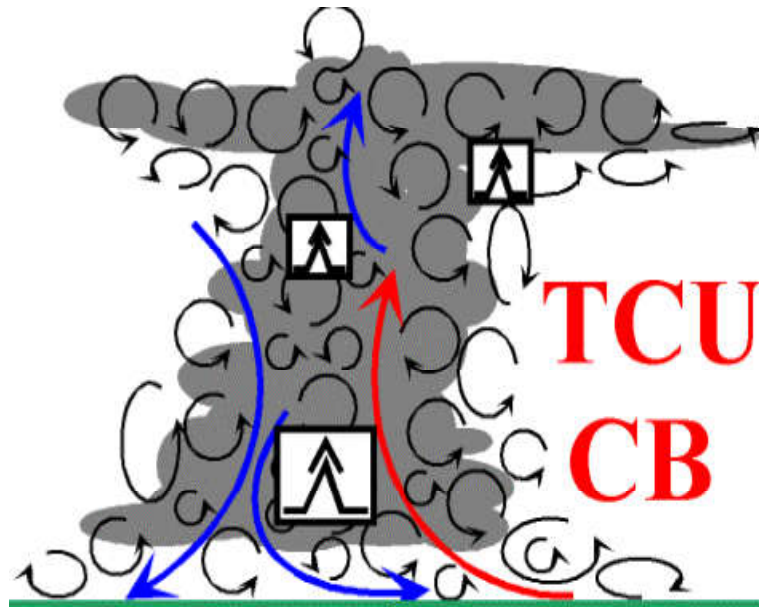


Fig. 2.5. Nuage convectif

- Le fort de rafale : siège de forts cisaillements, il se déplace à l'avant et avec la cellule orageuse (Fig. 2.6)

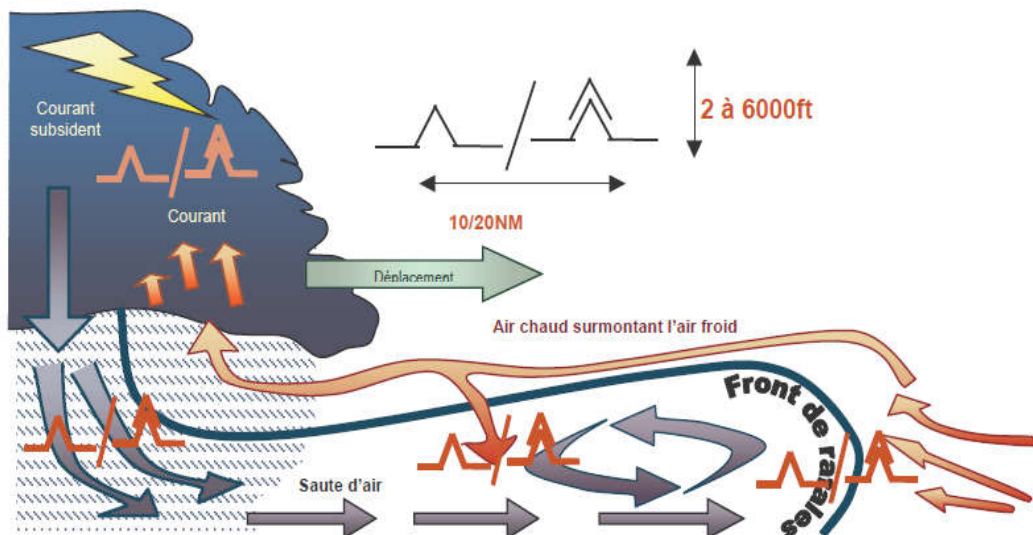


Fig. 2.6 Fort rafale

- Downburst : ces courants descendants, parfois violents peuvent modifier dramatiquement la trajectoire des avions sous la cellule orageuse. Ils correspondent

à une forte subsidence d'air froid, lourd, issu de la partie supérieure du nuage et sont généralement associés à des précipitations. Lorsque ces phénomènes sont de petite échelle (4km environ), on les nomme microbust. Ils sont alors à des vitesses verticales de l'ordre de 4000 ft/min et peuvent engendrer. Des rafales horizontales de l'ordre de 100kt (Fig. 2.7).

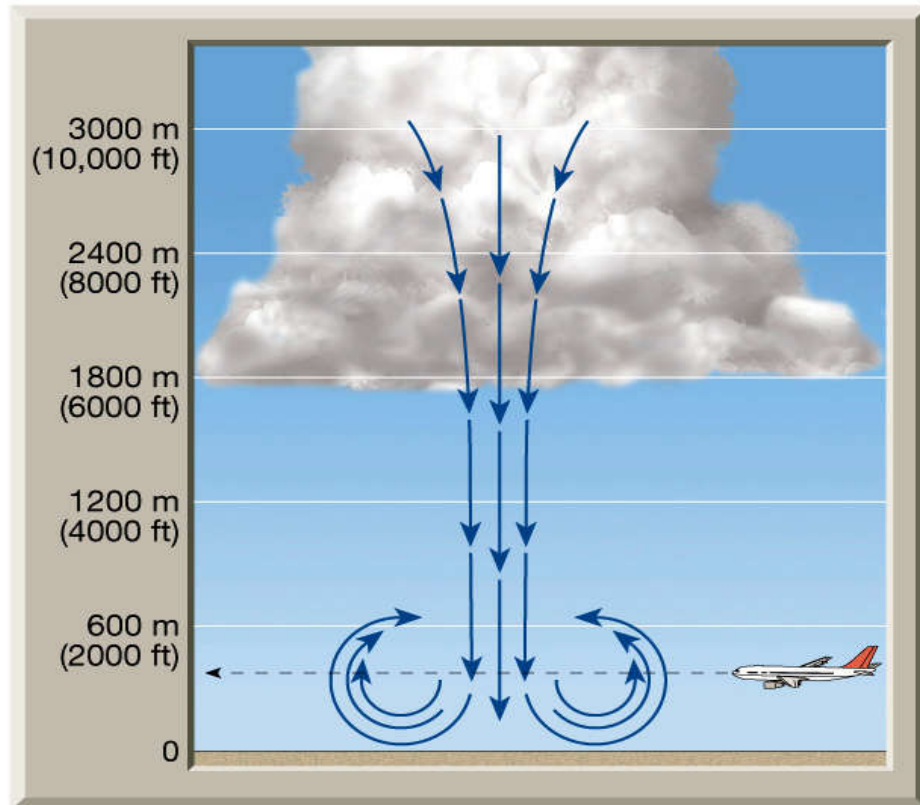


Fig. 2.7 Le Downbust

2.3. La turbulence dans un parc éolien

Dans un parc éolien, la turbulence a pour deux origines, l'état du terrain ou tout simplement la rugosité du sol désignée par le symbole Z_0 et la présence des éoliennes de front qui génèrent une turbulence ajoutée dans le sillage en aval. La zone sillage est la zone aérodynamique derrière une turbine éolienne qui se caractérise par un déficit de vitesse et une forte intensité de turbulence. A cet effet, plusieurs modèles de sillage ont été proposés pour décrire le sillage dans un parc éolien, l'un des modèles de sillage le plus complet est le modèle d'Ishihara [11]

2.3.1. Modèle d'Ishihara

Ishihara [11] a développé un modèle de sillage en utilisant des données d'une soufflerie pour un modèle réduit d'une éolienne pour les essais. L'une des caractéristiques importantes de ce modèle est qu'il tient compte des effets des turbulences : la turbulence ambiante liée à la rugosité de l'état du sol du parc et la turbulence générée due à la présence des éoliennes de front dans le parc.

La vitesse du vent dans le sillage U_w selon le modèle Ishihara est donnée comme suit:

$$U_w = U \left[1 - \frac{\sqrt{C_T}}{32} \left(\frac{1.666}{K_1} \right)^2 \left(\frac{x}{D} \right)^{-p} \exp \left(\frac{r^2}{D_w^2} \right) \right] \quad (2.2)$$

2.3.2. Turbulence liée au vent dans le sillage

Dans la planification des parcs éoliens, la connaissance de l'effet de l'intensité de la turbulence est importante pour la stabilité des turbines, ainsi pour le calcul de charges de la turbulence imposée sur le rotor et sur l'estimation de la puissance produite. Dans les basses couches de l'atmosphère, l'intensité et la direction du vent, sont des variables aléatoires et chaotiques pour cette raison, le vent est dit turbulent. Les variétés des différents obstacles et la nature du terrain sont principalement à l'origine de cette turbulence. L'indice de turbulence qui caractérise le degré de turbulence, appelé intensité de turbulence du vent pendant une période déterminée, elle influe sur les performances et la durée de vie d'une turbine éolienne à travers les fluctuations qu'elle induit sur les pales et sur le rotor en générale, donc, toute la structure de l'aérogénérateur subie des efforts de charge importants du fait qu'elle varie le champs de vitesse qui influe sur la pression instantanée.

L'intensité de la turbulence peut être décomposé en une composante, dite intensité ambiante I_a dépend de la rugosité du sol et de la hauteur de la turbine, et une composante, dite intensité ajoutée ou additionnée I_w générée par la présence d'une éolienne de front sur une autre éolienne dans le sillage (Fig. 2.8) [12].

$$I = I_a + I_w \quad (2.3)$$

La turbulence ambiante s'écrit ;

$$I_a = \frac{1}{\ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right)} \quad (2.4)$$

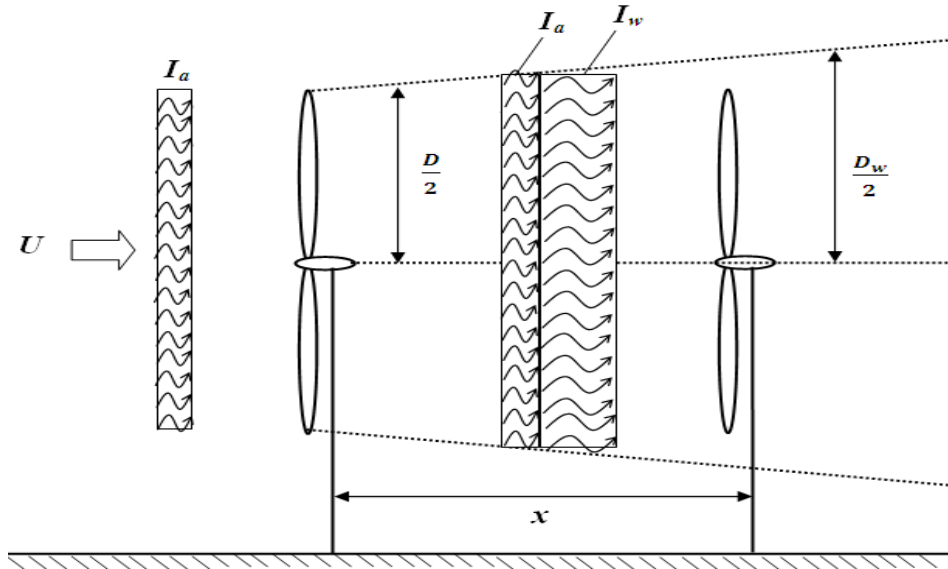


Fig. 2.8 Turbulence ambiante et turbulence ajoutée.

Dans un parc éolien, une éolienne peut être soumise à de multiples sillages résultants des turbines en amont. Ainsi le développement de l'intensité de la turbulence totale devait être affecté par les intensités entrantes (Fig. 2.9).

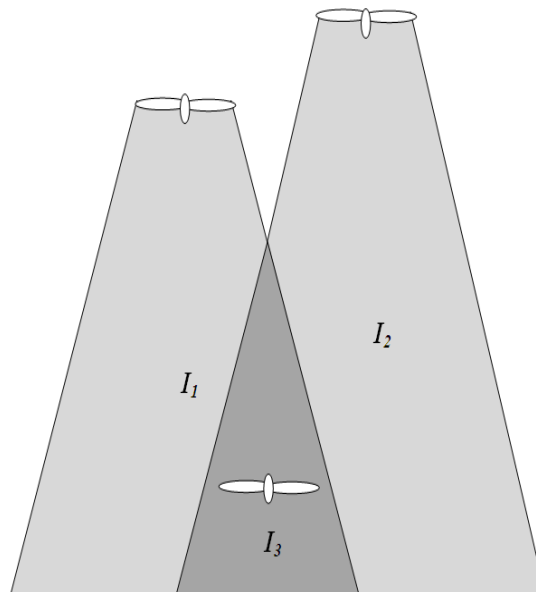


Fig. 2.9 Superposition des turbulences

La superposition des intensités de turbulence sur une turbine peut se faire de la façon suivante : la résultante des turbulences est obtenu lorsque ces intensités en additionnant quadrature de la turbulence ambiante et des turbulentes ajoutées comme suit [13]:

$$I = \sqrt{I_a^2 + \sum_{i=1}^N I_{w,i}^2} \quad (2.5)$$

L'illustration la plus simple du modèle physique de sillage d'Ishihara [11] adopté dans ce travail est présentée dans la figure 2.10. On voit clairement qu'en s'éloignant en aval de la turbine de front, le déficit de vitesse devient moins important et l'épaisseur du sillage s'accroît progressivement.

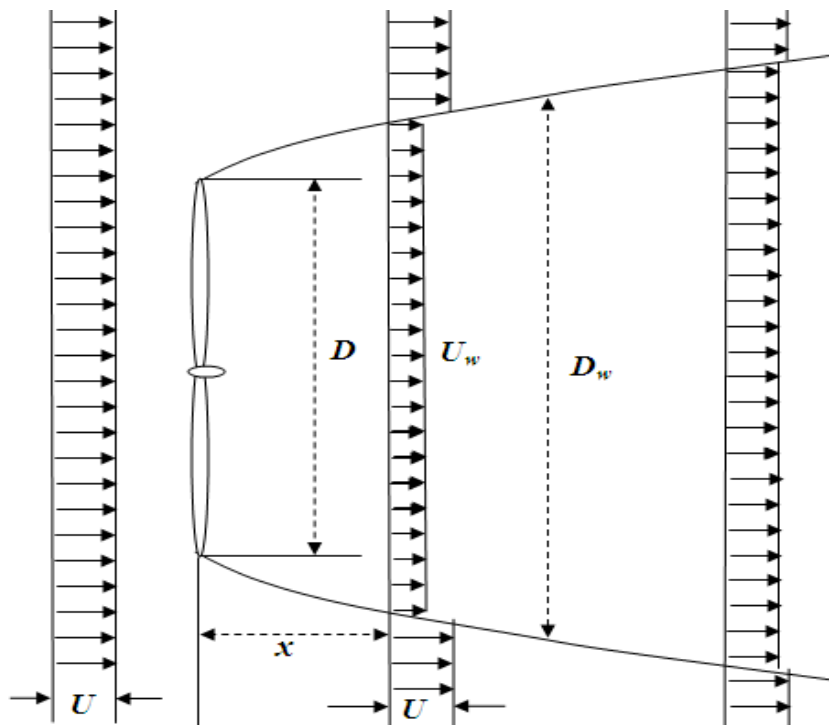


Fig. 2.10 Modèle physique du sillage d'Ishihara

En se basant sur le modèle idéal de Betz, l'expression de la vitesse du vent U_w dans le sillage d'un tel modèle est donnée par la relation suivante [14]:

$$U_w = U(1 - a_x) \quad (2.6)$$

Pour le cas d'une éolienne affectée par plusieurs sillages de différentes turbines en amont, on adopte le principe de la superposition par l'approche suivante [15] :

$$(a_x)_{total}^2 = \sum_{i=1}^N (a_x)_i^2 \quad (2.7)$$

Donc, la vitesse du vent dans le sillage multiple à une distance x en aval peut se réécrire de la façon suivante [16]:

$$U_w = U \left[1 - \sqrt{\sum_{i=1}^N (a_x)_i^2} \right] \quad (2.8)$$

où a_x qui en fonction de la distance x en aval, détermine le taux de déficit de vitesse de chaque modèle de sillage [11].

- Pour le modèle d'Ischihara ;

$$a_x = \frac{\sqrt{C_T}}{32} \left(\frac{1.666}{K_1} \right)^2 \left(\frac{x}{D} \right)^{-p} \exp \left(\frac{r^2}{D_w^2} \right) \quad (2.9)$$

et le diamètre de sillage [11]

$$D_w = D + \frac{K_1 C_T^{\frac{1}{4}}}{0.833} D^{1-\frac{p}{2}} x^{\frac{p}{2}} \quad (2.10)$$

Le paramètre p est une fonction de l'intensité des turbulences ambiante et ajoutée donnée par :

$$p = k_2(I_a + I_w) \quad (2.11)$$

où I_a et I_w représentent la turbulence ambiante et la turbulence générée respectivement exprimées comme suit :

$$I_a = \frac{0.5}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (2.12)$$

$$I_w = \frac{k_3 C_T}{\max(I_a, 0.03)} \left(1 - \exp \left(-4 \left(\frac{x}{10D} \right)^2 \right) \right) \quad (2.13)$$

Les coefficients k_1 , k_2 , k_3 sont respectivement 0.27, 6.0, 0.00455

Chapitre 3

Effet de la turbulence du vent

Introduction

Une éolienne va toujours créer un effet d'abri dans la direction du vent en poupe. En fait, il y aura toujours un sillage derrière l'éolienne, c'est-à-dire une longue traînée de vent qui est bien plus turbulente et ralentie que le vent devant le rotor, ceci est appelé turbulence. Dans les parcs éoliens, on espace en général les éoliennes d'une distance équivalente à trois fois le diamètre du rotor au minimum, afin d'éviter que la turbulence engendrée derrière chaque éolienne n'affecte trop la production énergétique des éoliennes situées plus en aval dans la direction des vents dominants, la distance entre les éoliennes est souvent encore plus grande. La turbulence est fortement liée à la rugosité du sol et à la présence des obstacles dans les parcs éoliens, L'étude des effets de la turbulence sur les performances des pales d'éoliennes

est très importante, car elle influe sur dans la production énergétique des fermes éoliennes et augmente les charges aérodynamiques sur les pales, ce qui provoque de fortes vibrations incidentes sur le bout de pales entraînant l'apparition de microfissures. Par convention, la hauteur de la rugosité ou tout simplement la rugosité du sol, est la hauteur au-dessus du sol où s'applique la condition d'adhérence, c'est-à-dire, le vecteur de vitesse moyenne du vent est égal au vecteur nul. La rugosité dépend pour chaque direction, de l'homogénéité du terrain, du type d'obstacles et de la distance sur laquelle ces deux conditions s'appliquent. Dans les couches géostrophiques proches, la vitesse du vent est loin d'être influencée par l'état de la surface du parc éolien. Donc, au dessous de cette couche, la vitesse du vent est toujours turbulente, en plus, la présence intense des éoliennes dans un site ne fait qu'augmenter le niveau de la turbulence.

La turbulence qui désigne l'état de l'écoulement d'un fluide, liquide ou gaz (vitesse du vent), en tout point à des caractères tourbillonnaire : tourbillons dont la taille, la localisation et l'orientation varient constamment. Les écoulements turbulents se caractérisent donc par une apparence très désordonnée. Dans les parcs éoliens, les propriétés turbulentes de la vitesse du vent dans le sillage d'une éolienne influencent significativement sur l'évolution du déficit de vitesse et du rayon croissant du sillage. Ainsi, le niveau de turbulence dans l'écoulement incident est généralisé sur toutes les éoliennes du parc. Dans ce travail, on présente une étude d'investigation sur l'effet de la turbulence sur la production totale d'électricité d'un parc éolien en utilisant le modèle de sillage Ischihara [3]. Pour discuter les résultats de simulation, les caractéristiques et la courbe de puissance de la turbine GAMESA G52 sont utilisées pour effectuer le calcul sont présentées dans le tableau 3.1 et la figure 3.1 respectivement.

Tableau 3.1 Caractéristique de la turbine GAMESA G52

Désignation	Valeur
Rayon de la pale	26 m
Hauteur du moyeu	55 m
Puissance nominale	850 kW

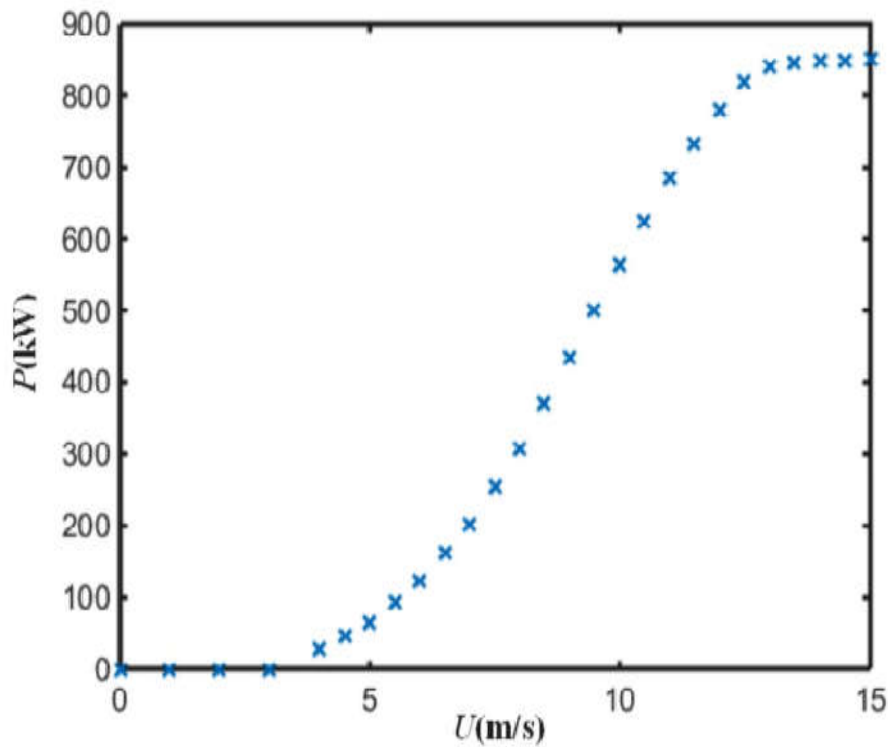


Fig. 3.1 Courbe caractéristique de la turbine GAMESA G52

La courbe de puissance de la turbine GAMESA G52 peut être modélisée par une fonction polynomiale somme suit :

$$P = \sum_{i=1}^M \alpha_i U^i \quad (3.1)$$

3.1. Effet de la turbulence

Les cas traités dans cette étude concernent une turbulence du vent qui couvre la turbulence ambiante et la turbulence additionnée (ajoutée). Pour ce faire, On procède à l'étude de la turbulence en fonction de la rugosité du terrain du parc éolien et la hauteur du moyeu.

3.1.1. Effet de la turbulence ambiante

L'état du sol influe par sa rugosité sur l'écoulement du vent qui de vient turbulente, en affectant de façon significative le profil de la vitesse du vent, de forts gradients de vitesse au voisinage du sol sont alors observés du fait de la condition de non-glissement. Donc, l'interaction entre la surface terrestre et le vent de la couche limite de surface est à l'origine de la turbulence ambiante I_a . Cette turbulence est fortement liée à la rugosité du sol et la hauteur de la turbine. Pour arriver à cette fin, nous allons déterminer l'effet de la rugosité du sol Z_0 et

de la hauteur du moyeu Z sur la turbulence ambiante I_a , on fait varier la hauteur Z pour des valeurs de la rugosité du parc en allant de la valeur à 0.001 m à 1.5 m et à chaque fois on calcule la valeur de la turbulence ambiante. La figure 3.2 illustre les résultats de simulation obtenus.

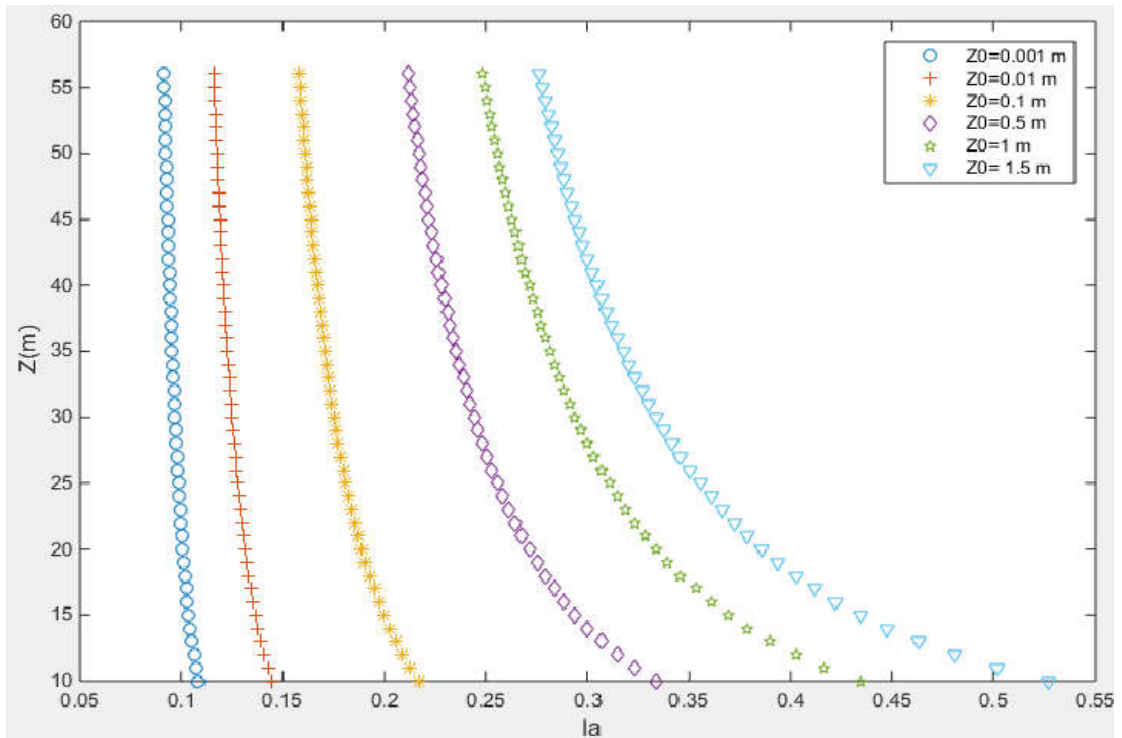


Fig. 3.2. Turbulence ambiante I_a en fonction de la hauteur du moyeu Z et de la rugosité Z_0 .

On peut observer clairement dans la figure ci-contre :

- En remontant vers le haut, I_a diminue légèrement puis se stabilise vers une valeur déterminée selon la rugosité du sol
- La présence des obstacles dans le proche immédiat du sol, ne fait qu'augmenter la turbulence ambiante
- La turbulence ambiante augmente considérablement avec la rugosité du sol
- Au même niveau de hauteur du moyeu Z , la turbulence ambiante a les mêmes effets sur toutes les éoliennes de la ferme éolienne.
- La vitesse de l'écoulement et le type de turbine éolienne est indépendante de la turbulence ambiante.
- La turbulence ambiante est indépendante de la position d'une éolienne de front qui génère le sillage

3.1.2. Effet de la turbulence ajoutée

Ce type de turbulence dite turbulence ajoutée ou générée est l'une des composantes de la turbulence souvent rencontrée dans le sillage des éoliennes regroupées dans les parcs éoliens. Cette turbulence est due à la présence des obstacles du site. Bien que d'origines différentes, les propriétés et les effets de la turbulence ajoutée sont les mêmes que la turbulence ambiante sur la puissance développée d'une ferme éolienne, donc, toutes les turbines du site sont affectées par ces deux turbulences selon leurs position en aval dans le sillage généré par une éolienne. De ce fait, pour une série de valeurs de rugosité allant de 0.001 m à 1.5 m, on varie la position adimensionnelle x/D en aval d'une turbine de front et on calcule l'indice de la turbulence générée correspondante.

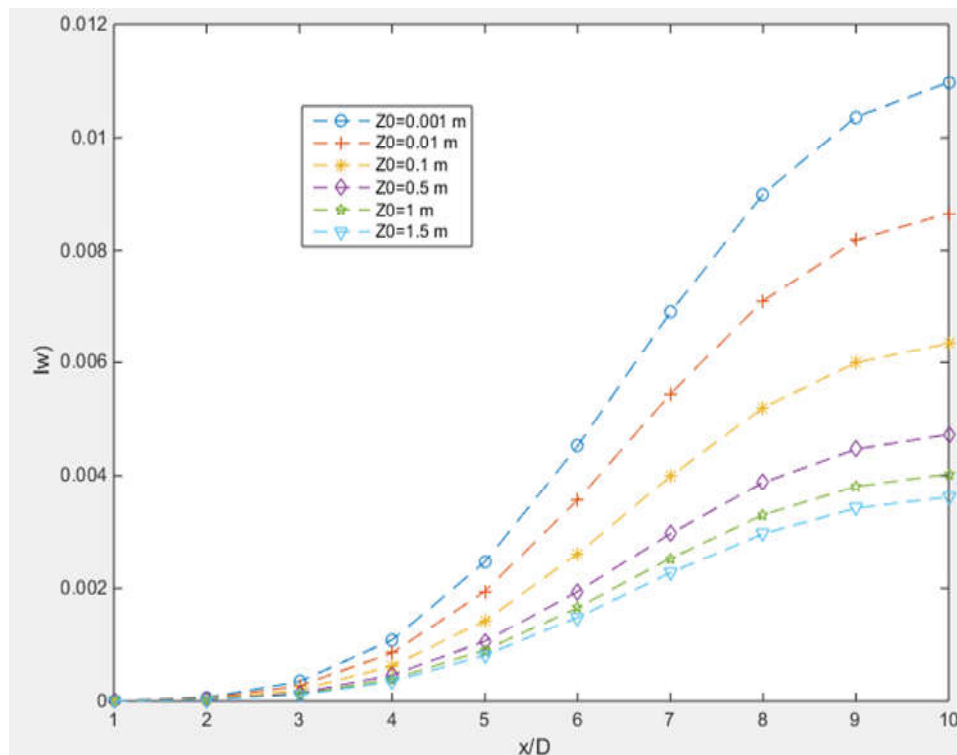


Fig. 3.3. Variation de la turbulence générée en fonction de la distance adimensionnelle x/D

En fixant la hauteur Z à la hauteur du moyeu, les résultats obtenus de simulation de la variation de la turbulence générée en fonction de la position adimensionnelle x/D , sont présentés dans la figure 3.3. On peut conclure donc :

- Dans les positions immédiates, les éoliennes sont peu influencées par la turbulence générée.
- Au delà de la position adimensionnelle $x/D=10$, les courbes affichent une stabilité vers des valeurs déterminées.
- Dans l'aval infini, la turbulence ajoutée tend vers les valeurs variant de 0.0035 à 0.0151 pour les valeurs de la rugosité variant de 0.001 m à 1.5 m, respectivement.
- On remarque également que la rugosité du terrain est inversement proportionnelle à la turbulence ajoutée, plus le site est rugueux, plus I_w est faible.

3.1.3. Effet de la turbulence ambiante sur la turbulence ajoutée

D'une manière générale, la turbulence ambiante ne dépend que de l'état de sol et la turbulence ajoutée est en fonction des obstacles du parc éolien. Pour investiguer plus la turbulence ajoutée on fait varier la turbulence ambiante sur des valeurs de la position adimensionnelle x/D allant de 1 à 10.

Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure 3.4.

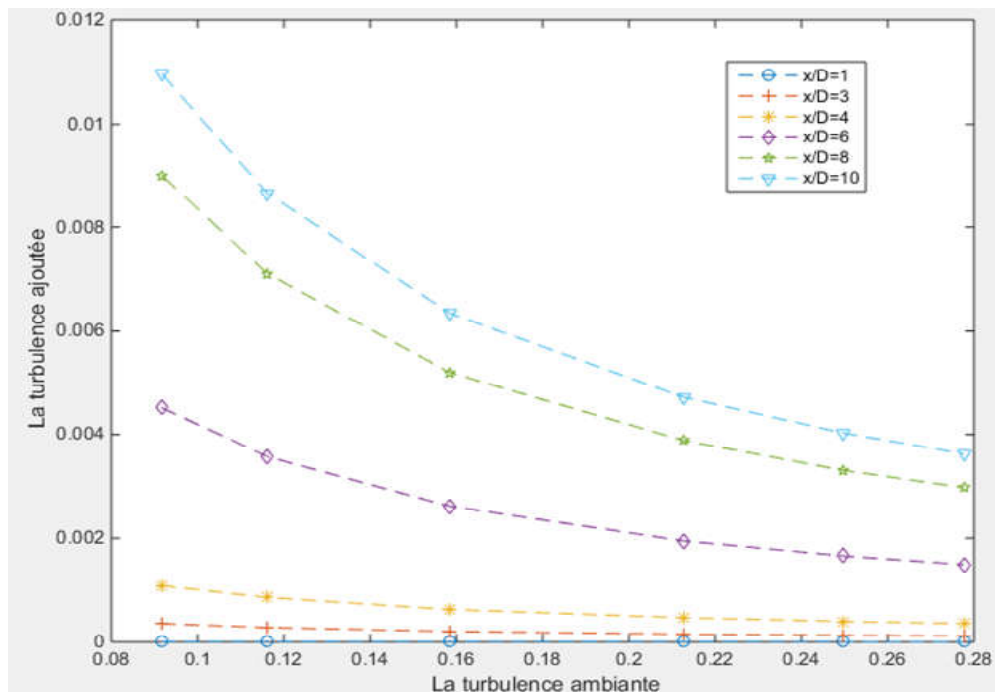


Fig. 3.4 Variation de la turbulence ajoutée en fonction de la turbulence ambiante

D'après cette figure, on peut tirer les remarques suivantes :

- La turbulence ajoutée est inversement proportionnelle à la turbulence ambiante pour la même position adimensionnelle x/D .

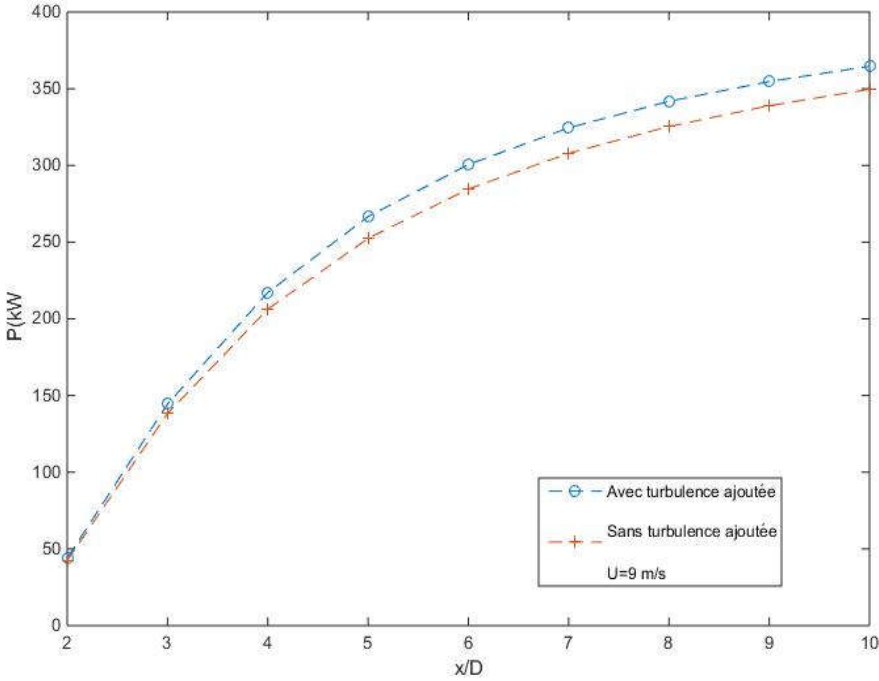
- Sur la vitesse du vent prédominante, les éoliennes éloignées dans le sillage sont peu influencées par les obstacles du parc éolien.

3.1.4. Effet de la turbulence générée sur la puissance

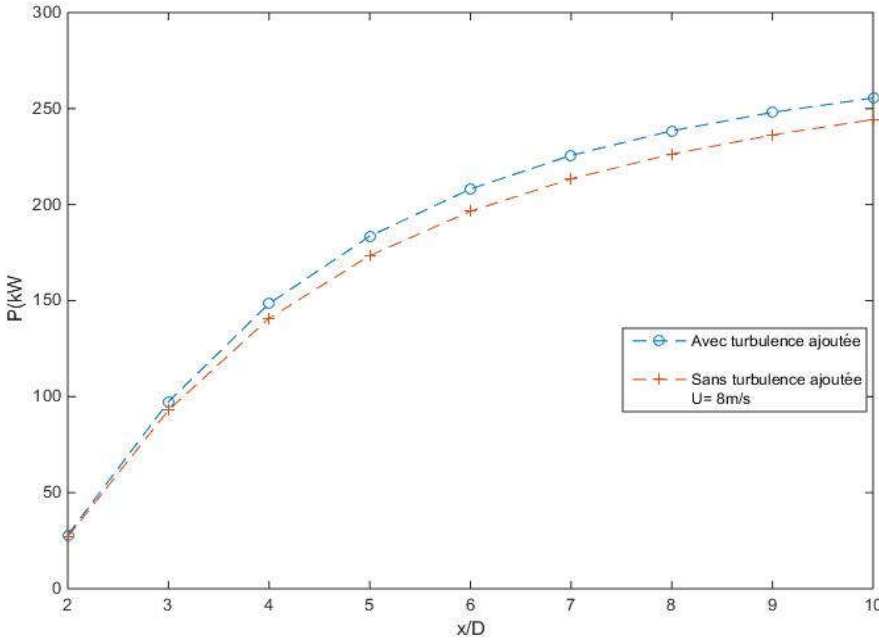
L'investigation de l'effet de la turbulence sur la production d'une turbine dans un parc éolien, peut être relevée par une comparaison de la puissance développée avec turbulence ajoutée avec celle sans turbulence ajoutée. Pour se faire, on fixe la rugosité du sol à 0.3 m d'un terrain agricole avec de nombreuses haies vives, ensuite, on effectue le calcul des puissances ; avec turbulence et sans turbulence d'une seule turbine pour les différentes vitesses uniformes et unidirectionnelles sur le disque actif; allant de 7 m/s à 9 m/s en variant uniquement la position adimensionnelle x/D dans l'aval d'une éolienne qui génère le sillage. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 3.2 et les figures 3.5 ; a, b et c respectivement.

Tableau 3.2. Effet de la turbulence sur la puissance d'une éolienne

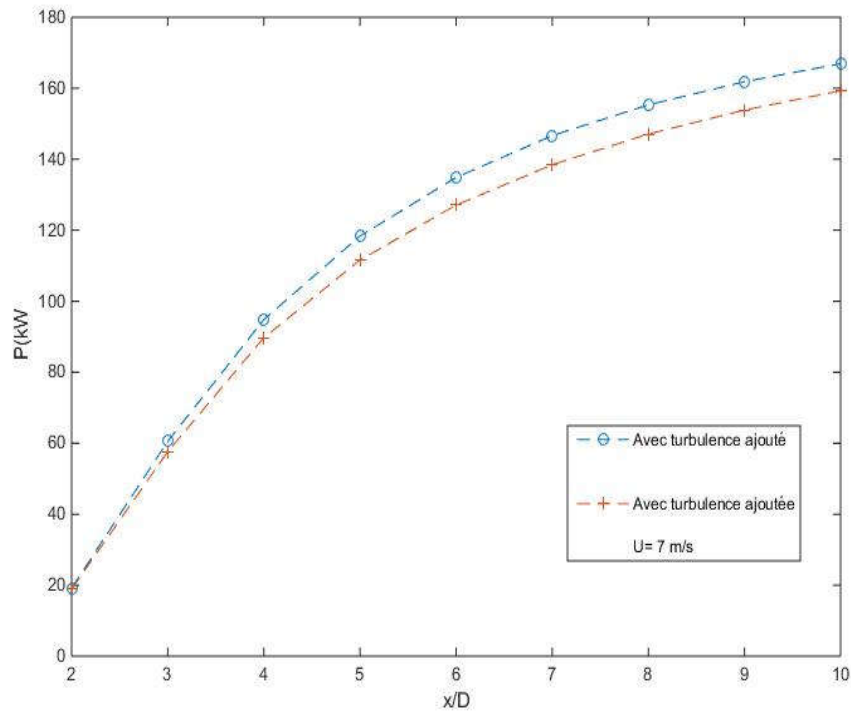
$U(\text{m/s})$	P_{max} avec turbulence (kW)	P_{max} sans turbulence (kW)
7	167.2	159.5
8	254.1	244.6
9	365.1	350.0



(a)



(b)



(c)

Fig. 4.9. Comparaison de puissance développée avec et sans turbulence ajoutée

Comme il être remarqué dans ces résultats, la puissance développée d'une éolienne est légèrement supérieure dans le cas où la turbulence générée est prise en compte pour les trois vitesses du vent, cela peut être expliqué qu'en raison de l'augmentation de la turbulence dans un écoulement, les échanges de quantité de mouvement sont plus élevés et par conséquent, la vitesse turbulente à travers la surface du rotor est plus grande et le vent est plus fort que dans le cas des vitesses sans turbulence ajoutée ([81], [82]).

D'une manière générale, on peut noter qu'une augmentation du niveau de la turbulence ambiante et générée sur une turbine qui produit l'énergie, se traduit systématiquement par :

- Une augmentation de la puissance mécanique de la turbine.
- Une augmentation des charges sur les pales.

Conclusion

Le but de ce travail est de mettre en évidence de l'effet de la turbulence sur un aérogénérateur. Comme on a pu le voir dans ce mémoire, la turbulence associée à l'écoulement du vent dans une ferme éolienne est fortement liée à l'état du sol et à la présence d'obstacles. Avec le modèle de sillage d'Ishihara proposé, les résultats de la simulation obtenus ont montré que la turbulence agit significativement sur la puissance développée par une éolienne, une augmentation du niveau de turbulence ambiante ou générée sur une turbine produisant de l'énergie se traduit systématiquement par une augmentation de la puissance mécanique de la turbine.

L'essentiel du reste du travail se résume comme suit :

- Un survol sur l'origine du vent, son aspect et ses caractéristiques.
- Une investigation sur la turbulence et la Proposition d'un modèle de sillage d'Ishihara
- L'effet de la turbulence sur une éolienne en utilisant les données et les caractéristiques de la turbine GAMESA G52

Comme perspective et suite à ce travail, une telle étude sur l'évaluation des charges imposées par la turbulence sur les pales d'une éolienne peut être proposée afin de permettre d'éviter les contraintes et renforcer la structure.

Références

[1] F. Ven Richthofen, *On the mode of origine of the læss, the Géological magazine*, Decade, vol.9, n°7, 1882, p293-305.

[2] www.cder.dz

[3] www.wikipédia.com

[4] eoliennesite.wordpress.com-énergie

[5] Association danoise de l'industrie éolienne (1997-2003) [windpower.org]

[6] P. L. Chamorro, F. Porté-Agel, *A Wind-Tunnel Investigation of Wind-Turbine Wakes: Boundary-Layer Turbulence Effects*, *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 132, Issue 1, pp. 129–149, 2009.

[7] G. Turbelin, *Modélisation de la Structure Atmosphérique en vue de l'Etude du Chargement Aérodynamique des Structures Soumises aux Effets de Vent*, Université d'Evry Val d'Essone, U.F.R. De sciences et Technologie, 2000.

[8] A. Peña, P. E. Réthoré, M. P. van der Laan, *On the application of the Jensen wake model using a turbulence-dependent wake decay coefficient: the Sexbierum case*, *Wind Energ*, 19:763–776, 2016.

[9] S. T. Frandsen, *Turbulence and turbulence generated structural loading in wind turbine clusters*, Risø-R-1188, 2007.

[10] Quentin Rodier, *Paramétrisation de la turbulence atmosphérique dans la couche limite atmosphère*, *Météorologie*, Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier), 2017.

[11] T. Ishihara, A. Yamaguchi, and Y. Fujino, *Development of a New Wake Model Based on a Wind Tunnel Experiment*, Tech. Rep, Global Wind, 2004.

[12] C. Ansorge, J. P. Mellado, *Global intermittency and collapsing turbulence in the Stratified planetary boundary layer*. *Boundary-layer meteorology*, 153(1) :89-116, (2014).

- [13] V. de Wiel, B. Moene, A. Hartogensis, O. De Bruin, H. and A. Holtslag, *Intermittent Turbulence in the stable boundary layer over land. Part III: Journal of the atmospheric sciences*, 60(20):2509-2522(2003).
- [14] L. Mahrt, *Stratified atmospheric boundary layers. Boundary-Layer Meteorology*, 90(3):375-396 (1999).
- [15] L. Mahrt, *Stably stratified atmospheric boundary layers. Annual Review of Fluid Mechanics*, 46:23-45 (2014).
- [16] A.Mittal, K.Sreenivas, *Investigation of Two Analytical Wake models Using Data From Wind Farms, International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Denver, (2011).*