

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie Mécanique

Laboratoire de Génie Mécanique et de Développement

Mémoire de Master

Pour l'obtention du diplôme de master en Génie Mécanique option Energétique

Anémométrie à la nacelle

Réalisé par :

Alaeddine BOUZOUALEGH

Sous la direction de :

Pr. Arezki SMAILI

Mr. Madjid TATA

Présenté et soutenu publiquement le : 28/06/2016

Composition du Jury :

Président :	Saïd RECHAK	Professeur, ENP, Alger
Promoteur :	Arezki SMAILI	Professeur, ENP, Alger
Co-promoteur:	Madjid TATA	Attaché de Recherche, CDER, Alger
Examineur :	Mohamed BOUBAKEUR	Maître assistant A, ENP, Alger

ENP 2016

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie Mécanique

Laboratoire de Génie Mécanique et de Développement

Mémoire de Master

Pour l'obtention du diplôme de master en Génie Mécanique option Energétique

Anémométrie à la nacelle

Réalisé par :

Alaeddine BOUZOUALEGH

Sous la direction de :

Pr. Arezki SMAILI

Mr. Madjid TATA

Présenté et soutenu publiquement le : 28/06/2016

Composition du Jury :

Président :	Saïd RECHAK	Professeur, ENP, Alger
Promoteur :	Arezki SMAILI	Professeur, ENP, Alger
Co-promoteur:	Madjid TATA	Attaché de Recherche, CDER, Alger
Examineur :	Mohamed BOUBAKEUR	Maître assistant A, ENP, Alger

ENP 2016

Remerciements

Je tiens en tout premier lieu à remercier DIEU tout puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience pour réaliser ce travail et d'achever mes études avec succès.

Je tiens à exprimer mes reconnaissances à mon promoteur Monsieur A. SMAILLI, qui m'a donné l'occasion de travailler sur un sujet passionnant, pour ses conseils judicieux ainsi que pour l'intérêt qu'il a toujours porté à l'égard de mon travail.

Je tiens à remercier mon Co-promoteur Monsieur M.TATA pour son aide, et sa disponibilité tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi que pour l'intérêt qu'il a toujours porté à l'égard de mon travail.

Je remercie également le président de jury Monsieur S. RECHAK et l'examineur Monsieur M.BOUBAKEUR d'avoir accepté d'examiner mon travail.

Je remercie enfin tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ma formation et à la réalisation de ce travail.

ملخص:

الهدف الرئيسي من خلال هذا العمل هو تقديم تقنية قياس شدة الريح باستعمال مقياس الريح المتواجد على مستوى الكنة، إضافة إلى تقديم العوامل المختلفة التي تؤثر على هذه التقنية مثل هندسة الكنة، الدوار والعديد من العوامل الأخرى التي تقدم في هذا العمل. وعرض أخيرا بعض الأعمال التي أنجزت حول هذه التقنية.

الكلمات الدالة : تقنية قياس شدة الريح, هندسة الكنة , مقياس الريح.

Abstract :

The main objective of this work is to present the measurement technique of the nacelle anemometry, which measures wind speed downstream of the wind turbine rotor and the various factors that influence measurements of the anemometer placed on the nacelle wind turbine for example: the geometry of the nacelle, rotor and several other factors which are presented on this work. And finally present some works on the technique of the nacelle anemometry.

Keywords: Nacelle anemometry, Wind turbine, Rotor.

Résumé:

L'objectif principal du présent travail est de présenter la technique de mesure de l'anémométrie à la nacelle, qui permet de mesurer la vitesse du vent à l'aval du rotor de l'éolienne ainsi que les différents facteurs qui influent sur les mesures par l'anémomètre placé sur la nacelle en l'occurrence la géométrie de la nacelle, le rotor et plusieurs d'autre facteurs qui sont citer sur ce travail. Enfin, quelque travaux antérieurs effectués sur la technique de l'anémométrie à la nacelle sont présenté.

Mots clés : Anémométrie à la nacelle, Eolienne, Rotor.

Table des matières

Liste des figures.....	5
Nomenclature.....	6
Introduction générale.....	7
1. Chapitre1 : Généralités sur l'énergie éolienne.....	8
1.1.Energie éolienne.....	9
1.2 Différents types d'éoliennes.....	9
1.3 Constitution d'une éolienne à axe horizontal.....	10
1.4 Principe de fonctionnement.	12
2. Chapitre2 : Introduction aux souffleries et notions d'aérodynamique.....	13
2.1 Performance des parcs d'éoliennes.....	14
2.2Anémométrie à la nacelle.....	15
2.3 Zones de fonctionnement de l'éolienne.....	16
2.4La mesure du vent.....	17
2.5Principe de la technique de mesure de l'anémométrie à la nacelle.....	18
2.6Les types d'anémomètres.....	18
2.7L'emplacement recommandé de l'anémomètre sur la nacelle.....	21
2.8. Etalonnage de l'anémomètre.....	21
2.9 Tests de performance.....	22
2.10 Effet de la pente du terrain.....	22
2.11 Effet du rotor.....	22
2.12 Effet de la géométrie de la nacelle.....	23
2.13 Effet des éoliennes voisines.....	23
2.14Effet de l'angle de calage.....	23
2.15 Effet de l'intensité de turbulence sur les mesures de l'anémomètre.....	24
2.16 Effet de l'inclinaison du flux.....	25
2.17 Effet des obstacles et de la rugosité.....	25
2.18 Caractériser le vent (prévoir la vitesse du vent libre).....	26
2.19 Travaux antérieurs sur l'anémométrie à la nacelle.....	27
Conclusion générale.....	30
Bibliographie.....	31

Liste des figures

Figure.1.1: (a) Éolienne à axes vertical et (b) à axe horizontal.....	10
Figure.1.2: Composantes d'une éolienne à axe horizontal	12
Figure.2.1: Anémométrie à la nacelle	16
Figure.2.2: Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent.....	16
Figure.2.3: Corrélation vitesse à la nacelle.....	18
Figure.2.4: Anémomètre coupelles.....	19
Figure.2.5: Anémomètre à fil chaud	19
Figure.2.6: Anémomètre à ultrasons.....	20
Figure.2.7: L'emplacement de l'anémomètre sur la nacelle	21
Figure.2.8: L'emplacement de l'anémomètre sur la nacelle	25
Figure.2.9: Distribution de la vitesse du vent.	26

Nomenclature

U_{nac} : La vitesse à la nacelle [m/s]

U_{inf} : La vitesse du vent libre [m/s]

V_{D} : La vitesse de démarrage [m/s]

V_{N} : La vitesse nominale [m/s]

V_{a} : La vitesse d'arrêt [m/s]

σ_u : L'écart type de la vitesse longitudinale du vent [m/s]

Introduction générale :

Depuis la nuit des temps, l'être humain n'a pas cessé de vouloir contrôler et exploiter l'énergie véhiculée par le vent. Au V^e II^eme siècle, les anciens perses, pour moudre le grain, ils inventèrent une simple roue à palette munie d'un axe vertical, entraînée par la force de traînée du vent. Par la suite, le concept s'améliora et le moulin à vent à axe horizontal, basé sur la force de portance, fut utilisé intensément aux Pays-Bas pour assécher les polders.

Il a fallu attendre le 20^eme siècle pour que les principales caractéristiques de l'éolienne moderne (axe horizontal, tripale, angle de calage variable) entraînant une génératrice électrique voient le jour. Depuis ce temps-là et d'année en année, les éoliennes n'ont pas arrêté de gagner en puissance et en fiabilité avec un coût de revient du kilowattheure de plus en plus bas.

En conséquent, la connaissance de la vitesse du vent est le facteur crucial pour le contrôle d'une turbine éolienne. En raison de sa conception bon marché et de son aspect pratique, un anémomètre monté sur la nacelle d'une éolienne à axe horizontal est la technique la plus prometteuse pour la mesure de la vitesse du vent et cela pour la gestion et le contrôle de la production d'énergie d'une éolienne. Toutefois, la mesure de cet anémomètre sur la nacelle est souvent entachée d'erreurs de diverses sortes. Ce projet consiste à évaluer les impacts sur la mesure de l'anémomètre à la nacelle en l'occurrence la géométrie de la nacelle, la turbulence du vent, l'angle de calage et plusieurs d'autres facteurs.

Chapitre 1 :

Généralités

Sur l'énergie éolienne

1.1.Énergie éolienne :

La demande mondiale de l'énergie éolienne a connu une croissance rapide depuis une quinzaine d'années. En 2015 environ 432 000 MW étaient installés mondialement, dont 145 000 MW en Chine et 74 000 MW aux Etats Unis [1].

Toutefois, cette technologie ne date pas d'aujourd'hui. En effet, depuis l'Antiquité L'être humain à exploité l'énergie du vent. Il y a plus de 5000 ans, les Égyptiens de l'Antiquité utilisaient des voiliers sur le Nil. Plus tard, des gens ont construit des moulins pour moudre le blé et d'autres céréales. Les premiers moulins à vent étaient connus en Perse (Iran). Ces premiers moulins à vent ressemblaient à de grandes roues à aubes. Des siècles plus tard, les habitants de la Hollande ont amélioré la conception de base du moulin. Ils lui ont donné des pales de type hélice, toujours réalisés avec des voiles.

À la fin des années 1920, les Américains ont de petites éoliennes pour produire de l'électricité dans les zones rurales sans électricité. Lorsque ces lignes ont commencé à transporter l'électricité aux régions rurales dans les années 1930, les moulins à vent ont été de moins en moins utilisés, mais ils peuvent encore être vus sur certains ranchs de l'Ouest Américain.

La crise du pétrole des années 1970 a changé l'image de l'énergie aux États Unis et dans le monde entier. Elle a crée un intérêt pour d'autres sources d'énergie, ouvrant la voie à l'émergence de l'éolienne pour produire de l'électricité. Au début des années 1980, l'énergie éolienne a vraiment décollé en Californie, en partie à cause des politiques gouvernementales qui encouragent les énergies renouvelables. Soutien de développement éolien et depuis elle s'est étendue à d'autres États, mais encore la Californie produit plus de deux fois plus d'énergie éolienne que tout autre États.

1.2 Différents types d'éoliennes :

D'une façon générale, il existe deux principaux types d'éoliennes : les éoliennes à axe horizontal et les éoliennes à axe vertical (figure 1). Les éoliennes à axe horizontal (plus fréquentes) doivent être dirigées directement vers le vent. Pour cette raison, elles sont dotées d'un système pour qu'elles soient constamment orientées face au vent. Celles à axe vertical ont pour atout de ne pas dépendre de la direction du vent, mais nécessitent une plus grande surface au sol pour l'installation des haubans que les éoliennes à axe horizontal [3].



Figure 1.1(a) Éolienne à axes vertical et (b) à axe horizontal.

1.3 Constitution d'une éolienne à axe horizontal:

Une éolienne à axe horizontale est composée de plusieurs éléments qui sont:

- **Le mât** : C'est une gigantesque structure d'acier ou de béton qui supporte l'éolienne, y amène les raccordements nécessaires et permet d'accéder à la nacelle. Elle maintient donc la nacelle en altitude, là où le vent est le plus constant et le plus fort.
- **Les pales** : elles représentent les éléments les plus importants du rotor, et elles sont le convertisseur de l'énergie cinétique du vent en couple mécanique (il y'a plusieurs points à prendre en considération pour la construction des pales tels que l'aérodynamisme et la structure).
- **La nacelle** : elle est montée au sommet du mât abritant les composants mécaniques, pneumatiques, certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine. À l'amont de la nacelle, nous trouvons le rotor de l'éolienne, c'est-à-dire les pales et le moyeu.

- **Le moyeu** est le point de raccordement entre les pales et l'arbre lent de la machine.
- **Le multiplicateur** relie l'arbre lent à l'arbre rapide en augmentant au passage de plus de 100 fois la vitesse de rotation.
- **La génératrice** est l'endroit où l'énergie cinétique (du mouvement) se transforme en énergie électrique.
- **L'arbre lent** de l'éolienne relie le moyeu du rotor au multiplicateur.
- **Le rotor** d'une éolienne moderne de 1 MW et plus (les pales et le moyeu) tourne assez lentement, environ 16 tours par minute. L'arbre contient un système de freinage hydraulique permettant l'opération des freins en cas de vents violents.
- **L'arbre rapide** tourne à environ 1 800 tours par minute et entraîne la génératrice électrique. Il est muni d'un frein mécanique à disque que l'on peut actionner en cas d'urgence, soit lorsque le frein aérodynamique est défectueux ou en cas de maintenance de l'éolienne.
- **La fondation** : est généralement conçue en béton armé. Elle doit être assez solide pour permettre de fixer toute la structure de l'éolienne.
- **L'armoire de couplage** au réseau électrique transforme la tension afin de rendre l'énergie produite par l'éolienne compatible à celle du réseau. Le convertisseur synchronise l'électricité produite par l'éolienne à celle présente sur le réseau.
- **Le frein** permet d'immobiliser le rotor de l'éolienne lorsque la vitesse du vent est trop élevée, en cas d'urgence ou lors des travaux d'entretien.
- **L'anémomètre** : mesure la vitesse du vent et permet d'indiquer le moment de mettre en route l'éolienne ou de l'arrêter. Il permet aussi d'évaluer les performances de l'éolienne et de reproduire la courbe de puissance ce qui représente l'axe de recherche de notre étude.
- **La girouette** : indique la direction du vent et permet à la nacelle de rester orientée face au vent.

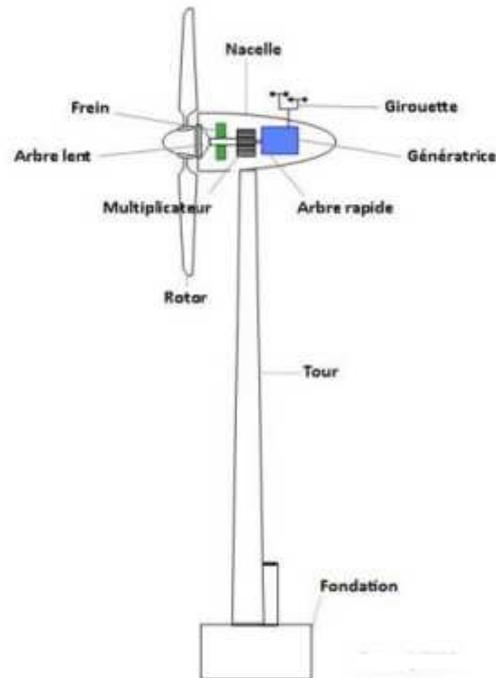


Figure 1.2 : Composantes d'une éolienne à axe horizontal

1.4 Principe de fonctionnement :

Les éoliennes modernes sont automatisées. Les forces aérodynamiques qui entrent en jeu dans leur fonctionnement sont les mêmes que celle qui sont créées par les ailes d'un avion. La plupart des éoliennes sont équipées par un anémomètre qui mesure continuellement la vitesse du vent. Lorsque celle-ci est assez élevée pour compenser la friction du rotor, les mécanismes de commande lui permettent de tourner et de produire ainsi une faible puissance. Cette vitesse, appelée vitesse de démarrage, est habituellement d'environ 4 m/s, soit la force d'une brise légère. La puissance produite croît rapidement au fur et mesure que la vitesse du vent augmente. Lorsque celle-ci atteint le niveau maximum admissible pour l'éolienne installée, les mécanismes de commande assurent la régulation à la puissance nominale. La vitesse du vent à laquelle une machine commence à fournir sa puissance nominale est appelée vitesse nominale. En générale, elle est d'environ 15 m/s. Si la vitesse du vent continue à augmenter, le système de commande arrête le rotor pour éviter que l'éolienne soit endommagée. Cette vitesse de d'arrêt est généralement d'environ 25 m/s [3].

Chapitre 2 :

Anémométrie à la nacelle

2.1 Performance des parcs d'éoliennes :

La base de cette technique consiste à établir une corrélation entre la lecture de l'anémomètre à la nacelle U_{nac} et la vitesse non perturbée U_{inf} . Cette corrélation est spécifique à chaque type d'éolienne car elle est principalement influencée par plusieurs paramètres tels que la géométrie de la nacelle et des pales. Dans un premier temps, cette relation est construite à l'aide de la machine référence du parc. Par la suite, on pose l'hypothèse que cette corrélation est applicable sur toutes les machines du parc. Il est alors possible de mesurer la courbe de puissance pour toutes les éoliennes. Cette technique évite donc l'installation d'une tour de référence pour chaque éolienne, ainsi que toute la procédure longue et coûteuse de la calibration de site.

Bien que déjà utilisée dans l'industrie, l'influence de plusieurs paramètres sur cette technique est toujours mal connue. Une étude du Riso s'est penchée sur certains de ces aspects. Par exemple, le type de corrélation à utiliser a été étudié. La technique des tiroirs (bins) [4] a été utilisée afin de déterminer la vraie relation entre les deux anémomètres. Les résultats obtenus démontrent qu'une régression linéaire entraîne des erreurs allant jusqu'à

3% sur la vitesse comparativement à moins de 1% pour une régression polynomiale du 5^e ordre. L'étude conclue donc que la technique des tiroirs doit être utilisée lors des tests de performances utilisant l'anémométrie à la nacelle.

Cette même étude compare également les courbes de puissances obtenues par la méthode traditionnelle (utilisant une tour référence et une calibration de site) et par la technique d'anémométrie à la nacelle. La différence entre les deux courbes est inférieure à 2%, ce qui est très faible. En effet, cet écart est plus faible que l'incertitude de la courbe de référence elle-même. Ces résultats démontrent la validité de cette technique sur terrain plat. La définition d'un terrain plat est formulée dans les normes IEC. Un des critères est que le pourcentage de la pente du terrain doit être inférieure à $3 H / 40$ (H Est la hauteur au moyeu de l'éolienne, sur une distance de $2 L$ (L est la distance entre la tour de mesure et l'éolienne). Si le terrain ne respecte pas ces critères, il est alors considéré comme complexe.

2.2 Anémométrie à la nacelle :

Utilisation de l'anémométrie à la nacelle :

La collection de données précises de vitesse du vent est l'un des éléments le plus problématique dans le contrôle et les tests de performance des éoliennes. Ces dernières sont caractérisées par trois vitesses qui sont la vitesse de démarrage (V_D), la vitesse nominale (V_N) et la vitesse d'arrêt (V_A) (voir figure 2.2). La vitesse d'arrêt varie d'une éolienne à une autre. En général, la plupart des éoliennes commerciales ont une vitesse d'arrêt de l'ordre de 25 m/s. Pour arrêter l'éolienne lorsque la vitesse du vent V_A est atteinte, un anémomètre est placé dans son voisinage (sillage proche, sur la nacelle de l'éolienne), mesure cette vitesse et envoie un signal aux systèmes de contrôle et d'arrêt de l'éolienne, tel que le système de contrôle de l'angle de calage, pour la mettre en mode drapeau.

Les propriétaires des parcs éoliens et les fabricants de turbine ont montré un intérêt dans l'utilisation des anémomètres placés sur la nacelle pour la collection de données de vitesse du vent [4]. Il est plus facile et économique d'installer un anémomètre sur la nacelle que d'implanter un mât de mesure qui doit être à la même hauteur que le moyeu de l'éolienne mené par un anémomètre devant l'aérogénérateur. Le problème le plus significatif avec cette pratique de l'anémométrie à la nacelle est que l'écoulement de vent est perturbé par le rotor et la nacelle, ainsi les mesures de vitesse du vent captées par un anémomètre placé à l'arrière de la nacelle ne représentent pas exactement des vitesses du vent non perturbé capturées par le rotor. Ce problème peut être évité si les mesures peuvent être ajustées ; cependant, afin d'effectuer un tel ajustement, des données doivent être collectées pour décrire le rapport entre les vitesses du vent non perturbé et l'anémomètre de la nacelle.

La méthode de l'anémométrie à la nacelle repose sur l'hypothèse de base que si une relation peut être établie entre la vitesse du vent indiqué par l'anémomètre et celle du vent non perturbé, alors il est possible d'estimer la courbe de puissance de l'éolienne sans avoir recours à la tour de référence.

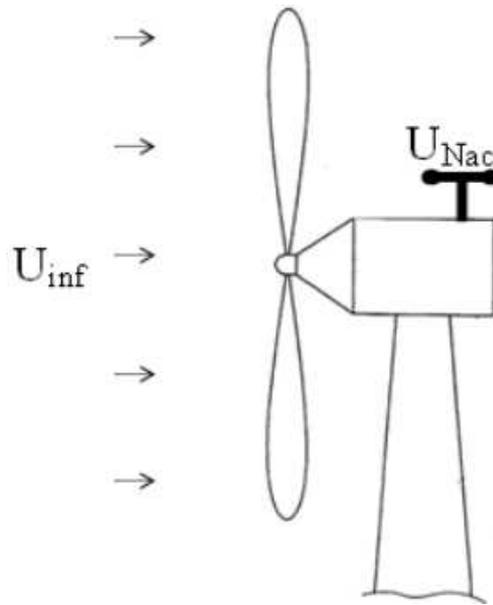


Figure 2.1 : Anémométrie à la nacelle.

2.3 Zones de fonctionnement de l'éolienne :

Compte tenu des informations précédentes, la courbe de puissance convertie d'une turbine, généralement fournie par les constructeurs, qui permet de définir quatre zones de fonctionnement pour l'éolienne suivant la vitesse du vent :

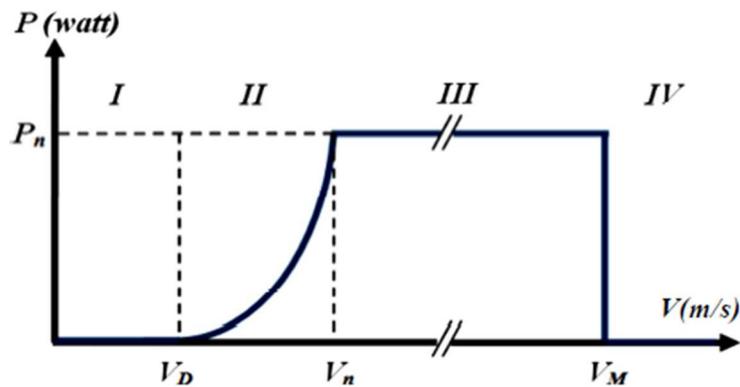


Figure 2.2: Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent.

V_D : La vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine. Suivant les constructeurs : V_D varie entre 2.5m/s et 4m/s pour les éoliennes de forte puissance.

V_n : La vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice. Suivant les constructeurs : V_n varie entre 11.5m/s et 15m/s en fonction des technologies.

V_M : vitesse du vent au-delà de laquelle il convient d'arrêter l'éolienne pour des raisons de sécurité et protéger l'éolienne contre les vents violents. Pour la grande majorité des éoliennes, V_M vaut 25m/s.

- **Zone I** : $V < V_D$: La vitesse du vent est trop faible. La turbine peut tourner mais l'énergie à capter est trop faible.
- **Zone II** : $V_D < V < V_n$: Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite. Cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle.
- **Zone III** : $V_n < V < V_M$: La puissance disponible devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de la puissance nominale de la turbine P_n . Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge.

2.4 La mesure du vent :

La mesure du vent se fait traditionnellement par des anémomètres. Les plus courants sont les anémomètres à coupelles et les anémomètres ultra-soniques. L'utilisation de ces capteurs, pendant des périodes supérieures à 1 an pour caractériser un site éolien, est une pratique standard .Ils fournissent la moyenne et l'écart type de la vitesse du vent et la variance de la vitesse dans les trois directions de l'espace. La précision de ces données est très importante pour l'estimation du potentiel éolien. Il est ainsi utile de bien comprendre ce qui est mesuré.

Il est d'usage de calculer la vitesse moyenne sur une période donnée, la vitesse longitudinale instantanée du vent est définie comme étant la somme de la vitesse moyenne U et la vitesse des fluctuations u' .

On peut s'intéresser à l'écart type de la vitesse du vent sur une période donnée qui va caractériser les variations de la vitesse autour de sa valeur moyenne.

$$\sigma_u = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (U_i - \bar{U})^2 \right)^{1/2} \quad (2.1)$$

Avec :

σ_u : L'écart type de la vitesse longitudinale du vent.

u_i : La vitesse instantanée lors de la $i^{\text{ème}}$ mesure.

u : La vitesse moyenne.

N : le nombre de mesure.

Comme la vitesse instantanée est la somme de la vitesse moyenne et de la vitesse fluctuante,

L'expression de l'écart type de la vitesse longitudinale devient :

$$\sigma_u = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (U'_i)^2 \right)^{1/2} \quad (2.2)$$

2.5 Principe de la technique de mesure de l'anémométrie à la nacelle :

La méthode de l'anémométrie à la nacelle repose sur l'hypothèse de base que si une relation peut être établie entre la vitesse de vent indiqué par l'anémomètre et celle du vent non perturbé, alors il est possible d'estimer la courbe de puissance de l'éolienne sans avoir recours à la tour de référence et sans passer par la procédure de calibration du site de l'IEC 61400-12 -1 [5]. En pratique cela pourrait signifier la création d'un rapport entre la vitesse à la nacelle et la vitesse du vent non perturbé pour une éolienne de référence dans un parc éolien et en supposant que la relation est la même pour toutes les autres turbines.

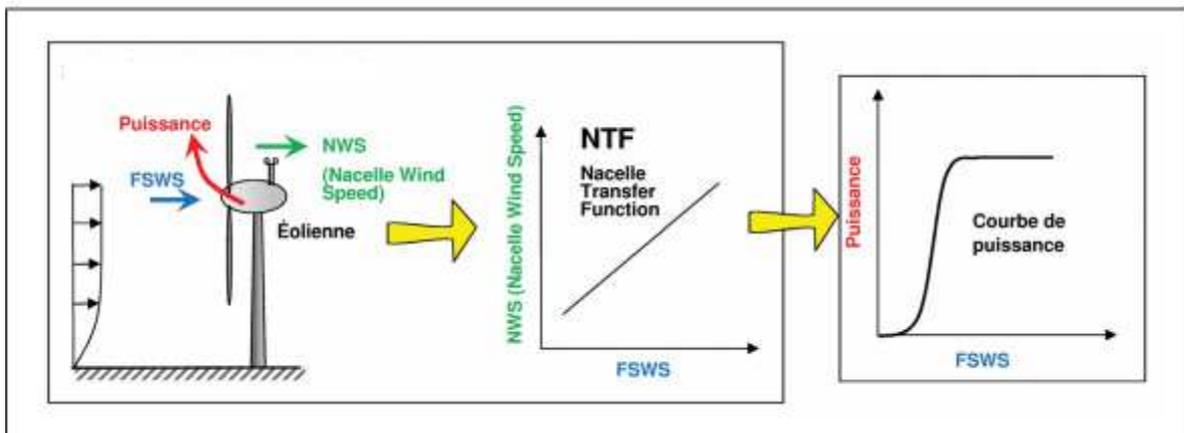


Figure 2.3 :Corrélation vitesse à la nacelle.

2.6 Les types d'anémomètres:

Un anémomètre est un appareil qui permet de mesurer la vitesse du vent. Il existe différents types d'anémomètres utilisant des principes de fonctionnement divers et variés [7] :

a) Anémomètre à coupelles:

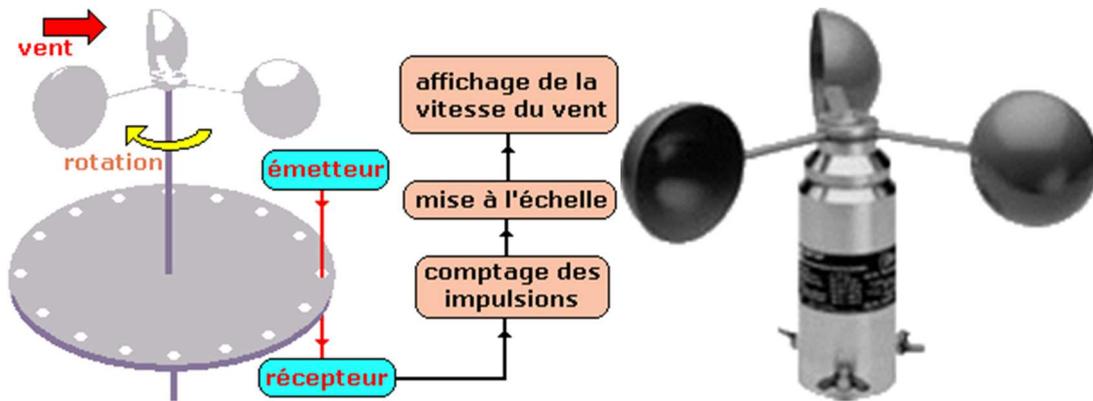


Figure 2.4: Anémomètre coupelles.

L'anémomètre à coupelle se compose de trois demi sphères fixées sur trois bras horizontaux.

Les bras sont disposés à 120 degrés et capables de tourner par rapport à un axe vertical. L'axe vertical est équipé d'un dispositif de comptage : la vitesse de rotation de l'anémomètre est proportionnelle à la vitesse du vent. L'appareil obtient la vitesse du vent par comptage des impulsions pendant un temps donné.

b) Anémomètre à fil chaud

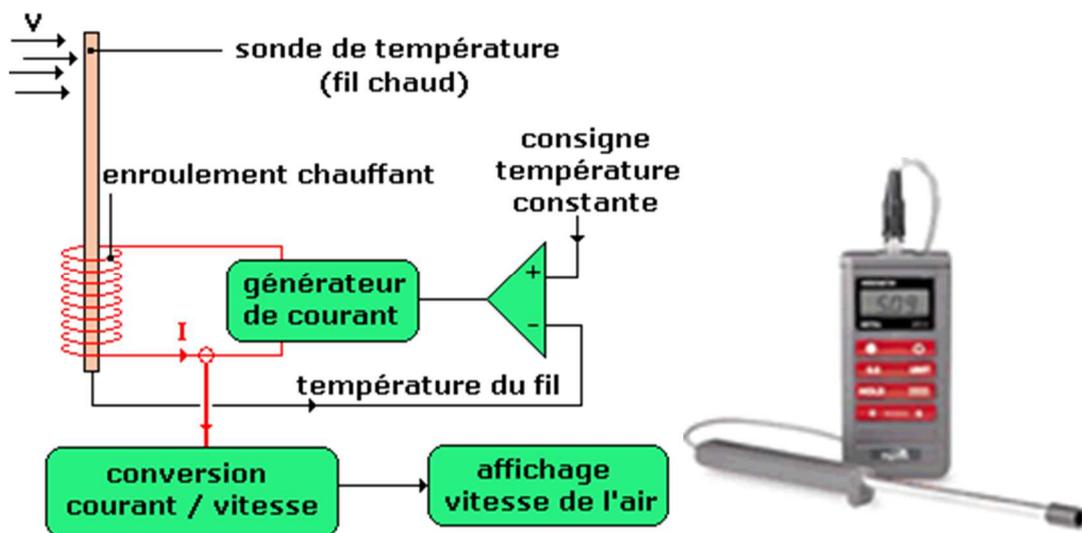


Figure 2.5 : Anémomètre à fil chaud

Le capteur (sonde de température) est chauffé en continu à une température supérieure à la température ambiante et refroidi par l'écoulement de l'air. Sa température est maintenue constante par un circuit de régulation, le courant de chauffage est proportionnel à la vitesse d'écoulement de l'air. Une autre technique consiste à utiliser deux fils chauds, l'un placé face au vent et l'autre à l'aval. Plus le vent est fort, plus le fil chaud à l'aval du vent se refroidit l'écart de température entre les deux fils donne la vitesse du vent. Ce type est souvent utilisé en souffleries.

c) Anémomètre à ultrasons :

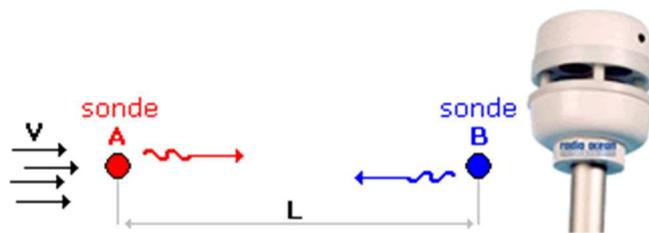


Figure 2.6: Anémomètre à ultrasons

Deux sondes à ultrasons (émetteur-récepteur) sont placées dans le flux d'air

$$t_1 = \frac{L}{c+V} \quad t_2 = \frac{L}{c-V} \rightarrow v = \frac{L}{2} \left(\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right)$$

Avec :

L : distance séparant les deux sondes

c : vitesse du son

V : vitesse de l'air

t1 : temps mis par l'onde sonore pour aller de A vers B

t2 : temps mis par l'onde sonore pour aller de B vers A

L'appareil obtient la vitesse du vent à partir de la mesure des temps t1 et t2

2.7 L'emplacement recommandé de l'anémomètre sur la nacelle:

Selon les recommandations de l'IEC, l'anémomètre doit être situé dans le plan de symétrie de la nacelle. Il doit être quelque part le long de la nacelle où les mouvements et les vibrations ainsi que les zones d'écoulement tourbillonnaire, les zones de recirculation et d'écoulement mort sont minimales (voir figure 2.7) [4].

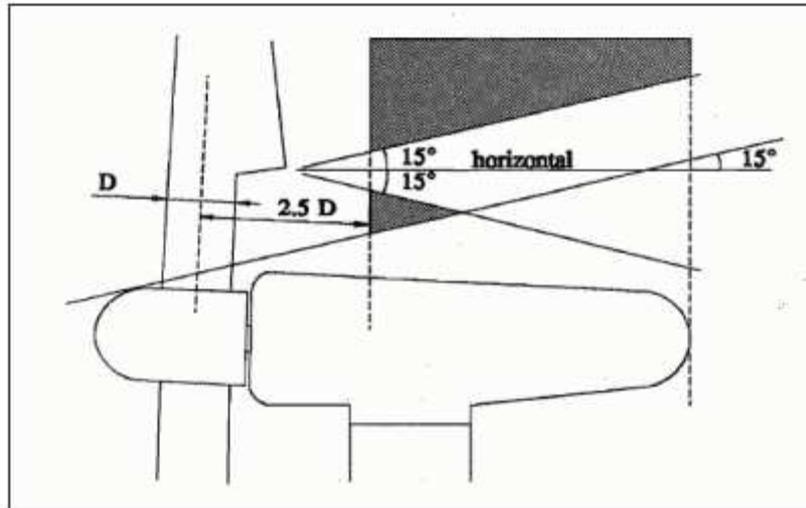


Figure2.7 : L'emplacement de l'anémomètre sur la nacelle

La distance entre l'anémomètre et l'axe de la base de la pale ne devrait pas être inférieure à 2,5 fois le diamètre de cette dernière. L'étude de l'écoulement de l'air dans le voisinage de la nacelle d'une éolienne implantée dans un terrain incliné doit être prise en compte puisque l'anémomètre peut être influencé par le sillage de la nacelle. Dans de telles situations, l'anémomètre doit être installé plus près de la pale. La position verticale de l'anémomètre doit être de sorte qu'il soit loin de la couche limite autour de la nacelle. L'anémomètre ne doit pas être placé dans le sillage dû à la transition brutale possible de la partie circulaire de la base de la pale à la partie profilée. Il est recommandé que l'anémomètre soit monté à une position de 15° au-dessus d'une ligne inclinée en aval tangente à la partie supérieure de la nacelle ou du moyeu comme indiqué dans la Figure2.7. Il est également recommandé que, afin d'éviter l'influence des tourbillons de la base, l'anémomètre soit monté en dehors d'une zone de $\pm 15^\circ$ ayant son point de départ à la transition de la forme cylindrique de la base à la partie profilées des pales.

2.8 Etalonnage de l'anémomètre :

Les tubes de Pitot sont des systèmes mécaniques stables, dont à long terme des caractéristiques de fonctionnement sont pratiquement pas affectés dans des conditions

d'exploitation qui prévalent habituellement dans des installations d'étalonnage anémomètre. Pour les tubes de Pitot conformes aux exigences de la norme ISO 3966, l'intervalle de 10 ans d'étalonnage est recommandé.

2.9 Tests de performance :

Les tests de performance constituent une étape importante de tout développement éolien. Pour toutes les éoliennes autres que celle de référence, cette étape implique une utilisation fréquente de l'anémométrie à la nacelle. Cette dernière est influencée par de nombreux facteurs dont plusieurs pourront être étudiés dans ce travail :

- application de l'anémométrie à la nacelle pour des éoliennes opérant dans le sillage d'une autre turbine en opération.
- influence d'un site complexe sur l'anémométrie à la nacelle. Notre étude permettra ainsi de déterminer si les relations trouvées peuvent s'appliquer aux autres éoliennes.
- influence de l'utilisation de différents anémomètres (à coupelles vs soniques) sur les tests de performance.

2.10 Effet de la pente du terrain :

La pente du terrain a deux effets majeurs sur l'écoulement de l'air : la vitesse d'écoulement et la distorsion de l'écoulement. La présence de la nacelle améliore l'accélération de l'écoulement causé par l'escarpement, en particulier en dehors de la position de l'anémomètre. Cependant, la vitesse horizontale à l'emplacement de l'anémomètre a tendance à diminuer avec l'augmentation de la pente du sol. Cette tendance est due en grande partie à la suite de la nacelle. Cette zone perturbée est caractérisée par la présence d'un flux séparé et deux tourbillons opposés qui sont sensibles à l'inclinaison de l'écoulement. La fonction de transfert de la nacelle (corrélation vitesse à la nacelle en fonction de la vitesse de vent libre) évaluée est influencée par la pente du terrain, mais cette sensibilité est réduite en déplaçant la position de l'anémomètre vers le haut du corps de la nacelle [6].

2.11 Effet du rotor :

Le rotor, la pale avec sa partie profilée et sa racine cylindrique engendre un sillage en rotation ainsi qu'un tourbillon dont l'impact sur la nacelle perturbe l'écoulement au niveau de l'anémomètre. Certains paramètres opérationnels, tels que la variation de l'angle de calage et

la vitesse de rotation du rotor peuvent aussi influencer l'écoulement aux alentours de l'anémomètre.

2.12 Effet de la géométrie de la nacelle:

Une étude porte sur l'écoulement de l'air autour de la nacelle uniquement a été réalisée, sans prendre en considération le rotor. Ceci correspond au cas spécifique où l'éolienne est à l'arrêt, et qu'aucune pale n'est positionnée à la verticale, laissant libre l'écoulement face à l'anémomètre. Elle a permis de trouver une accélération autour de la nacelle. La distribution des vitesses axiales a permis de bien visualiser le ralentissement de l'écoulement en amont, dû à la présence d'un obstacle. Puis le fluide est accéléré autour de la nacelle pour finalement décélérer en aval de l'obstacle. Une zone de recirculation, où des vitesses négatives sont enregistrées, est présente à l'arrière de la nacelle.

2.13 Effet des éoliennes voisines:

La distance entre les éoliennes a un impact significatif sur les mesures par l'anémomètre. En effet, une éolienne installée à une distance de $3D$ derrière une autre est très influencée par le sillage de cette dernière. Et plus la distance entre les éoliennes est grande ($5D$) plus les résultats s'approchent des mesures dans le sillage. Donc plus les éoliennes sont proches les unes des autres plus les effets du sillage augmentent [3].

2.14 Effet de l'angle de calage :

Sur une éolienne contrôlée à calage variable (appelée aussi une éolienne à pas variable), l'anémomètre mesure la vitesse du vent avec une fréquence d'échantillonnage supérieure ou égale à 1Hz . En cas de vitesse très élevée ($>25\text{m/s}$) l'anémomètre envoie une commande au dispositif de calage qui pivote immédiatement les pales légèrement sur le côté, hors du vent. Inversement, les pales seront pivotées de manière à pouvoir mieux capter de nouveau l'énergie du vent, dès que le vent aura baissé d'intensité.

Concevoir une éolienne à pas variable suppose une ingénierie très avancée afin d'assurer le positionnement exact des pales. En général, le système de régulation pivote les pales de quelques degrés à chaque variation de la vitesse du vent pour que les pales soient toujours positionnées à un angle optimal par rapport au vent, de façon à assurer le meilleur rendement possible à tout moment. Le mécanisme de calage est normalement opéré par un système hydraulique ou bien par un moteur pas-à-pas.

2.15 Effet de l'intensité de turbulence sur les mesures de l'anémomètre :

En pratique, un anémomètre placé sur une nacelle d'éolienne peut être utilisé pour la mise en mode drapeau de l'éolienne c.-à-d. la mise en marche pour des vitesses supérieures ou égales à 4 m/s et la mise à l'arrêt pour des vitesses supérieures à 25 m/s. En outre, l'anémométrie à la nacelle peut être aussi utilisée pour l'évaluation des performances des éoliennes. Ce pendant, il est nécessaire que les caractéristiques de vitesse du vent qui doivent être obtenus pour la conception de l'éolienne sont destinées à l'écoulement d'air vers le rotor. Par conséquent, de façon classique, afin d'obtenir la valeur de la vitesse du vent de l'écoulement libre à l'amont du rotor, un mât est installé à un endroit avec une certitude élevée d'avoir la même condition de vent que l'éolienne, et un anémomètre qui est placé sur le mât à une hauteur qui est à peu près la même hauteur que le moyeu de l'éolienne. La vitesse moyenne du vent dans le cas d'un vent presque horizontal, peut être corrigée à un équivalent à la vitesse moyenne du vent de l'air circulant vers le rotor en prenant une corrélation entre la vitesse du vent qui est mesurée par l'anémomètre sur la nacelle pendant le fonctionnement de test et la vitesse du vent qui est mesurée par l'anémomètre sur le mât de référence. L'intensité de la turbulence ainsi, peuvent en pratique être corrigés pour un équivalent à l'intensité de la turbulence de l'écoulement d'air vers le rotor en prenant la corrélation entre la vitesse du vent mesurée par l'anémomètre sur la nacelle au cours du fonctionnement d'essai, et la vitesse du vent qui est mesurée par l'anémomètre sur le mât de référence.

Cependant, une éolienne à axe horizontal a un anémomètre qui se trouve sur la nacelle à l'aval du rotor de l'éolienne, de sorte qu'il est impossible d'obtenir des données efficaces pour l'intensité de la turbulence. En d'autres termes, il est impossible d'évaluer la puissance et la durabilité, tout en tenant compte de l'intensité de la turbulence. Par conséquent, les constructeurs des éoliennes mesurent l'intensité de turbulence de l'écoulement de l'air à l'amont du rotor en installant des capteurs de mesure de vitesse de vent sur le nez du rotor des éoliennes à axe horizontal. La nacelle de l'éolienne tourne autour d'elle-même pour suivre la direction de vent prédominante, les valeurs obtenues à partir de l'anémomètre sur la nacelle est différente de la valeur qui est mesurée lorsque la nacelle est dans un état immobile. Cependant, le mouvement de la nacelle est inévitable pendant la mesure. Par conséquent, même lorsque l'obtention de la valeur de l'intensité de la turbulence absolue, il est nécessaire de prendre en considération les effets du mouvement de la nacelle par rapport à la valeur mesurée de l'anémomètre à la nacelle.

2.16 Effet de l'inclinaison du flux :

Dans les évaluations de la courbe de puissance pour des terrains très complexes basés sur l'anémomètre à la nacelle peut être liée à des erreurs importantes. Si l'inclinaison du terrain est extrême, la déformation de l'écoulement par le corps de la nacelle (et rotor) peut changer causée par l'inclinaison de l'écoulement vertical. Par conséquent, la correction nacelle anémomètre dérivée pour une faible inclinaison du terrain peut ne plus être valide. La correction de l'anémomètre à nacelle dérivée pour un terrain en pente douces conduit à une courbe de puissance surestimée par rapport à la courbe de puissance du mât sur la base (d'étalonnage du site inclus). Le problème peut être résolu en choisissant un positionnement approprié de l'anémomètre de la nacelle sur la nacelle comme cela est illustré sur la Figure 2.8.

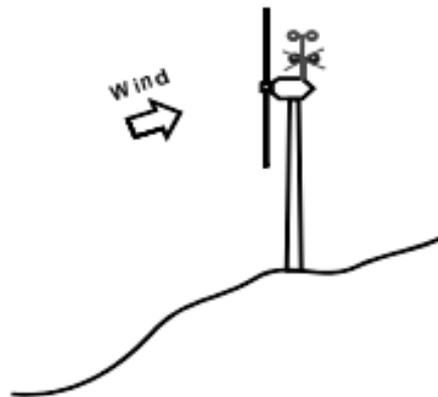


Figure 2.8 : Effet de l'inclinaison sur l'anémomètre.

Après la modification de la position de l'anémomètre pour une nouvelle correction d'anémomètre dans les terrains à faible inclinaison la récupération de la courbe de puissance de l'éolienne peut être effectuée [6].

2.17 Effet des obstacles et de la rugosité :

Les obstacles, tels qu'une maison, une grange ou une haie, peuvent freiner localement le vent. Il se crée une zone d'abris en aval (par rapport à la direction du vent) de l'obstacle où le vent sera faible et tourbillonnaire. Pour éviter que la production d'une éolienne se trouve fortement affectée par la présence d'un obstacle, l'éolienne est placée à une distance variant entre 20 à 40 fois la hauteur de l'obstacle. La couverture générale du site est constituée d'un nombre infinitésimal d'obstacles de diverses grandeurs. Ces éléments (buisson, herbe, arbres, etc.)

couvrant le sol ont tendance à freiner le vent dans son écoulement. Ce concept est nommé rugosité et est défini grâce à la longueur de la rugosité, soit la hauteur à partir de laquelle la vitesse du vent n'est plus nulle. Ainsi, une zone forestière ou une zone urbaine aura une rugosité très élevée alors que celle d'un plan d'eau ou d'une plaine herbeuse sera beaucoup moindre. Une zone de rugosité faible est privilégiée parce que le vent y subit moins l'effet de friction que cause la couverture du sol.

2.18 Caractériser le vent (prévoir la vitesse du vent libre) :

La distribution de Weibull est constituée principalement de deux informations importantes : La vitesse moyenne, ici 4,6m/s soit 16,6km/h (1m/s = 3,6km/h). Cette répartition possède généralement la forme suivante :

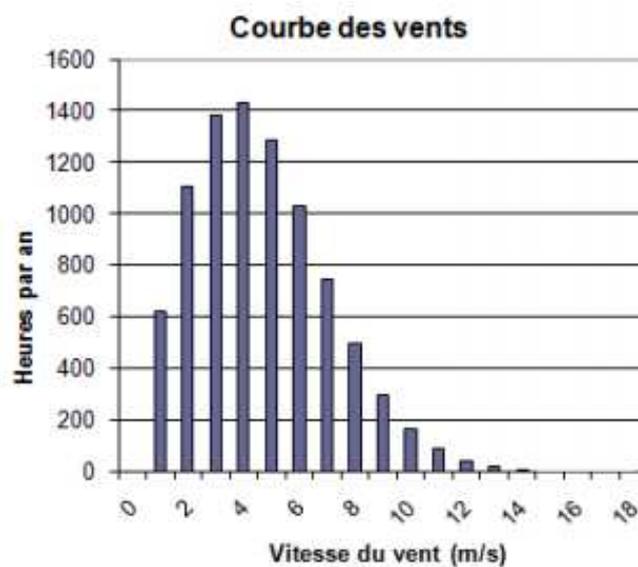


Figure 2.9 :Distribution de la vitesse du vent.

Le facteur de forme va indiquer la forme de notre courbe. Plus le facteur de forme est élevé, plus les vents sont réguliers. Le facteur de forme est ici de 2. Dans l'exemple ci-dessus, on remarque que les vents les plus fréquents sont des vents faibles à moyens. Généralement les bons sites ont des vitesses de vents moyens allant de 4m/s à 6m/s, il ne sert donc à rien d'avoir une machine capable de récupérer des vents de 18m/s, ceux-ci n'ayant lieu que trente secondes par an.

2.19 Travaux antérieurs sur l'anémométrie à la nacelle :

a) Etude numérique de l'anémométrie à la nacelle (Université du QUÉBEC à RIMOUSKI):

Dans l'optique d'améliorer les performances d'une éolienne est son contrôle, ce projet consistait à construire un modèle afin d'examiner l'écoulement d'air autour d'une turbine éolienne et d'évaluer l'impact de la géométrie de la nacelle et de la turbulence du vent sur la mesure de l'anémomètre à la nacelle. Le rotor a été modélisé par la théorie du disque actuateur dans le but de construire ce modèle. La théorie de l'élément de pale permet de déterminer les forces de surfaces agissant sur le disque actuateur et ainsi de calculer la différence de pression à la traversée du rotor. Ce modèle a permis d'évaluer des corrélations entre les mesures de vitesse de l'anémomètre de la nacelle et les vitesses réelles de vent non perturbées, en fonction de la position de l'anémomètre choisie. Sur le long terme, ce modèle permettra d'étudier les phénomènes de turbulence et de sillage, d'étudier l'influence de la topographie du sol ou encore de construire un module de simulation de parc éolien [6].

b) Anémométrie à la nacelle en présence de sillage d'éoliennes :

(ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE UNIVERSITÉ DU QUÉBEC)

Dans ce projet, une étude numérique a été effectuée afin d'établir des relations entre U_{inf} et U_{nac} et pour améliorer l'efficacité et la précision de l'anémométrie à la nacelle, particulièrement dans des conditions d'opération en sillages. Un nouveau modèle de simulation de l'écoulement autour d'une éolienne à axe horizontal opérant dans le sillage a été proposé, une évaluation de l'impact de la rotation des pales sur la relation entre U_{inf} et U_{nac} en présence de sillage a été réalisée, suivie par la détermination de la position appropriée de l'anémomètre sur la nacelle. Pour valider les techniques de simulation numérique utilisées, l'étude a été réalisée en collaboration avec le Centre de Recherche sur l'Énergie aux Pays-Bas (ECN) qui a fourni des données expérimentales recueillies sur le site pour effectuer des comparaisons avec les résultats des simulations numériques et établir ainsi des modèles de corrélation plus adéquats pour l'utilisation de l'anémométrie à la nacelle. En général, des résultats plus précis ont été obtenus avec le modèle proposé qu'avec une méthode numérique utilisant le modèle **k-epsilon** standard avec des constantes modifiées. Ceci est principalement attribuable au terme de transfert d'énergie introduit dans l'équation du taux de dissipation. En outre, la méthode

numérique s'est avérée être un outil utile pour déterminer la position appropriée des anémomètres sur une nacelle [3].

b) Analyse de l'interaction rotor/nacelle à l'aide du disque actuateur et de la ligne actuatrice :

(ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE UNIVERSITÉ DU QUÉBEC)

Ce projet de doctorat concerne la simulation numérique de l'écoulement dans le sillage proche des éoliennes. L'analyse se base surtout sur l'interaction du sillage issu du rotor avec la nacelle à l'emplacement de l'anémomètre. Le principal objectif était l'élaboration d'une méthode de mécanique des fluides assistée par ordinateur (CFD) afin d'évaluer l'écoulement au niveau du rotor et son interaction avec la nacelle. La méthodologie consistait en une résolution des équations de Navier-Stokes moyennées par la décomposition de Reynolds. Des calculs bidimensionnels axisymétriques (2D) et tridimensionnels (3D) sont réalisés avec l'approche des volumes finis sous le code commercial Fluent. L'écoulement est considéré complètement turbulent où deux modèles de fermeture à deux équations de transport sont utilisés. Étant donné la proximité de l'anémomètre à la paroi de la nacelle, cette dernière est représentée aussi fidèlement que possible dans le maillage. Dans un premier temps, la forme de la nacelle et son impact sur la NTF est analysée. Pour les simulations 3D, une attention particulière est portée aux conditions aux frontières afin de reproduire une couche limite atmosphérique neutre et un sol rugueux à travers une loi de paroi appropriée. Une modélisation assez simple du rotor est retenue qui est celle du disque actuateur uniformément chargé. Les effets moyens de la rotation des pales sont reportés sur une surface poreuse à l'écoulement. La force normale prescrite est évaluée à partir du coefficient de poussée de l'éolienne simulée. L'emploi d'une approche 3D, lorsque la géométrie de la nacelle est complexe, ainsi que l'utilisation du modèle de turbulence $k-\omega$ sst par rapport au $k-$, avec une simple loi de paroi standard au niveau de la nacelle, permettent une bonne prédiction de la NTF. Dans un deuxième temps, la rugosité du sol, la proximité du sol par rapport à la nacelle, ainsi que les phénomènes d'accélération et d'inclinaison de l'écoulement qu'engendrent les escarpements, sont analysés et leurs impacts sur la NTF quantifiés. Afin de diminuer l'effet de la pente du sol sur l'écoulement au niveau de la nacelle, il suffit d'installer l'anémomètre à une plus grande distance de la surface de la nacelle. Dans la dernière partie de ce travail, l'analyse est focalisée sur la représentation des effets des pales sur l'écoulement. Trois modélisations différentes du rotor sont considérées et comparées dans un écoulement

turbulent où la présence du sol est négligée. L'approche du disque actuateur avec chargement uniforme de la première partie est reprise et comparée à une version plus généralisée du disque actuateur où la rotation du sillage est considérée par la méthode de l'élément de pale. Enfin, l'approche de la ligne actuatrice est implémentée et validée. C'est une technique qui considère chaque pale distinctement, comme une ligne où des forces axiales et tangentielles sont injectées dans l'écoulement. La rotation des pales est prise en compte en considérant les équations qui régissent l'écoulement dans un repère en rotation. La ligne actuatrice permet une meilleure capture de la structure tourbillonnaire du sillage juste derrière le rotor, et ainsi une NTF calculée avec moins d'incertitudes par rapport à l'approche du disque actuateur.

Conclusion générale :

L'anémométrie à la nacelle est une technique de mesure de la vitesse à l'aval du rotor de l'éolienne. Etant donné que les tests de performances et le système de mise en mode drapeau des éoliennes exigent comme paramètre de référence la vitesse non perturbée à l'amont du rotor, des corrélations semi-empiriques sont alors développées entre la vitesse de vent mesurée à l'anémomètre de la nacelle (U_{nac}) et la vitesse du vent libre non perturbé (U_{inf}). La mesure de l'anémomètre placé sur la nacelle est influencée par plusieurs paramètres entre autres :

- La géométrie de la nacelle,
- La couche limite autour de la nacelle,
- Le sillage proche généré par le rotor et la nacelle,
- La couche limite atmosphérique,
- L'angle de calage et la position de l'anémomètre sur la nacelle.

Cette corrélation peut être améliorée et optimisée à travers des simulations numériques de l'écoulement de l'air autour de la nacelle. Ceci fait l'objet du travail présenté. Pour cela une attention particulière est aussi donnée pour la recherche de la position optimale de l'anémomètre sur la nacelle afin d'éviter les zones perturbées par la couche limite et le sillage proche.

Bibliographie

- [1] <https://irenanewsroom.org/2016/04/10/renewable-energy-breaks-growth-record-in-2015/>
Consulté le 02 juin 2016.
- [2] B. Smith, H. Link, G. Randal and T. Mc Coy. 2002: Applicability of nacelle anemometer measurements for use in turbine power performance tests. Conference Paper.
- [3] Manal BENCHAGRA, ANÉMOMÉTRIE À LA NACELLE EN PRÉSENCE DE SILLAGE D'ÉOLIENNES, ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE UNIVERSITÉ DU QUÉBEC MONTRÉAL, LE 17 NOVEMBRE 2010.
- [4] Madjid TATA, L'Anémométrie à la Nacelle : Alternative pour les Tours Météorologiques
Division Energie Eolienne – CDER.
- [5] Etienne BIBOR, VALIDATION DE LA TECHNIQUE D'ANÉMOMÉTRIE À LA NACELLE EN TERRAIN COMPLEXE, ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE UNIVERSITÉ DU QUÉBEC, MONTRÉAL, le 12 SEPTEMBRE 2005.
- .
- [6] Oloufemi FAKOREDE ETUDE NUMÉRIQUE DE L'ANÉMOMÉTRIE À LA NACELLE, UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI, QUÉBEC Avril 2012.
- [7] <https://sitelec.org/cours/abati/anemo.htm/> Consulté le 02 juin 2016.