



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



Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Option : CONVERSION THERMIQUE

Thème :

Profil et Extrapolation Verticale des Paramètres du Vent

Par :

M^r TOUAIBIA Abdallah

Soutenu le 27/09/2016 devant le jury composé de :

Semmar Djaffer	Professeur à Université de Blida1	Présidente
Merzouk Mustapha	Professeur à Université de Blida1	Examineur
Ouali Randa	MAA à Université de Blida1	Examineur
Kasbadji Nachida	Directrice de Recherche à l'UDES	Promoteur

ملخص:

في عملنا هذا نهتم بطاقة الرياح (عنفة الهواء)، توفرها و خصائصها بحيث إستطاعتها الطاقوية و تقديرها، و تحديدا في منطقة قصر الشلالة، حيث أننا بإجراءنا المقارنة بطرق استقراء بين المدى الطويل و القصير، نحن نستخدم البيانات التي تم جمعها من قبل مقاييس شدة الرياح على ارتفاعات معينة وتمثل نمذج قصيرة وطويلة المدى للاستقراء بتقدير الارتفاع، ومقارنة النتائج هي من خلال احتساب الأخطاء النسبية، و البرمجة المتقدمة في ماتلاب تسمح لنا بتشغيل الملفات و معالجتها، يتم عرض النتائج بيانيا، وتقدر معاملات وايبييل (ج و ك) من خلال طريقة احتمالات تسمى الحد الأكبر لفريسمبلانس، من أجل المعطيات الخام و المقدره الطريقة الملائمة قد بينها، نجد بأن قانون الإستطاعة التي لديها معامل المتغير هي الملائمة في طرق الإستقراء بالأجل القصير وبشأن طرق الإستقراء بالأجل الطويل نجد أن طريقة جوستيس و ميخائيل هي الأفضل، و هذه الأخيرة هي ذات نتائج أكثر ملاءمة بينهما، التطبيق يسمح لنا بمعرفة الإستطاعة الطاقوية للعنفة الهوائية فيستاس V80-2.0 ذات مولد بلستطاعة تقدر ب 2 ميغواط باستعمال طريقة الإستقراء بالأجل الطويل.

الكلمات الدالة: طاقة الرياح، طرق الإستقراء، ماتلاب، وايبييل

Résumé:

Dans le présent travail, nous nous intéressons à l'énergie éolienne, sa disponibilité et ses caractéristiques telles que la puissance et son estimation, plus précisément dans la région de Ksar El Chellala, ou nous avons effectué une comparaison entre la méthode d'extrapolation à long et à court terme des paramètres du vent avec les données prélevées par les anémomètres aux hauteurs représentées. la comparaison des résultats s'effectuent à travers le calcul de l'erreur relative. Un logiciel développé sous MATLAB permet la lecture des fichiers, les résultats obtenus sont affichés sous forme graphique. Les paramètres de Weibull (c et k) sont estimés par la méthode de vraisemblance. Pour les données brutes et celles extrapolées le modèle le plus adéquat a été déterminé, on trouve pour la méthode à court terme que la loi de puissance a coefficient variable est la plus adaptée et en ce qui concerne l'extrapolation à long terme le modèle de Justus et Mikhaïl convient le mieux. Une application permettant l'estimation de la production énergétique de l'aérogénérateur Vestas V80-2.0 MW a été effectuée en utilisant le modèle à long terme.

Les mots clé : l'énergie éolienne, méthode d'extrapolation, MatLab, Weibull,

Abstract:

In this work, we focus on wind energy, its availability and its features such as power and its estimate, specifically in the area of Ksar El Chellala, or we made a comparison between the extrapolation method long term and court of wind parameters with the data collected by the anemometers at heights représentées. la comparison of results is carried out through the calculation of the relative error. Software developed in MATLAB allows playback of files, the results are displayed graphic. The form Weibull parameters (c and k) are estimated by the likelihood method. For those raw data and extrapolated the most suitable model has been determined, there is method to the short-term as the power law has variable coefficient is the most suitable and regarding long-term extrapolation model Justus and Mikhail suits the best. An application to estimate the energy production of the wind turbine Vestas V80-2.0 MW has been performed using the model in the long term.

Key word: wind energy, extrapolation method, MatLab, Weibull,

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes parents, Mon frère et la famille TOUAIBIA et TOUAIBI, ainsi qu'à mes proches amis Fodil OUARET, Kadir CHABOU, Ibrahim BEN SAFIA, Achraf MESLEK, Abdenour HOUARI, Bilal BOUHRIS, Abdelkarim BESSADI, Sid Ali ZEROUKI, Amine ZIBOUCHE, Hamza GUERMI, Samir BOUCHAALA, Amine NASRI, Amine BOUHADI, Youcef et son frère Kamel BOUFELAH, Lilya HOUARI,.... .. etc.

Je le dédie aussi à mon chef d'atelier de travail de la menuiserie des meubles Samir BOUCHAALA, et le prof Mohamed BOURAADA.

Enfin je ne saurais oublier mes enseignants du département énergies renouvelables ENR, les enseignants au long de mon cursus et mes camarades de classe.

Je le dédie aussi à tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

Remerciements

Avant tout, je tiens à remercier dieu tout puissant de m'avoir prêté la force, le courage et les moyens nécessaires pour achever ce travail.

Mon immense gratitude revient à mes parents et mon petit frère, qui ont su me prêter main forte quand j'en avais besoin et qui n'ont pas hésité pour me remettre sur le droit chemin si je m'égarais, leurs années de sacrifices portent enfin leurs fruits et j'espère de tout cœur qu'ils seront fière de cet accomplissement.

Je remercie également celle sans qui tout cela ne serait pas arriver Dr Nachida Kasbadji Merzouk qui a su me guider mais aussi être à mon écoute. Elle a mis sa grande expérience à mon profit et son temps à mon entière disposition comme elle a su être patiente avec moi et pour cela je lui suis redevable.

Je remercie les membres de jurés pour avoir pris de leur temps pour examiner et critiqué ce travail pour l'amélioration de mes capacités.

Aussi je remercie tous mes professeurs et enseignants qui m'ont appris tout ce que je sais aujourd'hui, et tous les employés de l'UDES qui m'ont beaucoup soutenu pour la réalisation de ce travail, j'en garderai que de bons souvenirs.

Et pour finir un grand merci à mes amis et collègues, pour toutes les nuits ou je les ai gardé éveillés avec moi, pour mes sautes d'humeurs qu'ils pardonnent, pour leurs conseils et leurs considération mais aussi leurs soutient le long de ce projet.

Liste des figures

Figure 1.1. Tracé de la carte des vents à 10 et 25 d'altitude.....	8
Figure 2.1 : Profil de vent moyen au-dessus d'un couvert de hauteur.....	16
Figure 2.2 : Gradient thermique pendant la Journée.....	17
Figure 2.3 : Gradient thermique pendant la nuit.....	17
Figure 2.4 : Schéma d'un aérogénérateur.....	22
Figure 2.5 : Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent.....	23
Figure 3.1 : Carte identité de site [46].....	26
Figure 3.2: Topographie du site [47].....	27
Figure 3.3: Station de mesure du vent [48].....	28
Figure 3.4 : organigramme des modèles choisis.....	30
Figure 3.5: L'organigramme de programme développé sous MATLAB.....	31
Figure 3.6 : La courbe de puissance d'éolienne V80-2,0 MW [50].....	32
Figure 4.1 : La variation de vitesse à différent hauteur en fonction de temps.....	35
Figure 4.2 : Fréquences et Distribution de Weibull à chaque hauteur.....	37
Figure 4.3 : Tracés des distributions et Les Fréquences.....	37
Figure 4.4 : Tracé de la vitesse moyenne en fonction de différentes hauteurs.....	38
Figure 4.5 : L'organigramme de la densité de puissance disponible.....	39
Figure 4.6 : Distribution de Weibull et fréquences selon la loi logarithmique.....	40
Figure 4.7 : Tracés comparatifs des résultats à différent hauteur avec le résultat de mesures brutes à 40 m selon la loi logarithmique.....	40
Figure 4.8 : Distribution de Weibull et fréquence selon la loi de puissance.....	41
Figure 4.9 : Tracés comparatifs des résultats à différent hauteur avec le résultat de mesures brutes à 40 m selon loi de puissance.....	42
Figure 4.10 : Distribution de Weibull et fréquence selon la loi de puissance 1/7.....	43
Figure 4.11 : Tracés comparatifs des résultats à différent hauteur avec le résultat de mesures brutes à 40 m selon la loi de puissance 1/7.....	43
Figure 4.12 : Distribution de Weibull et fréquences selon la loi de puissance modifiée.....	44
Figure 4.13 : Tracés comparatifs des résultats à différent hauteur avec le résultat de mesures brutes à 40 m selon la loi de puissance modifiée.....	45
Figure 4.14 : Distribution de Weibull et fréquences selon la loi de puissance à coefficient variable.....	46
Figure 4.15 : Tracés comparatifs des résultats à différent hauteur avec le résultat de mesures brutes à 40 m selon la loi de puissance à coefficient variable.....	46
Figure 4.16 : Distribution de Weibull et fréquences selon le modèle de Justus et Mikhail.....	48
Figure 4.17 : Tracés comparatifs des résultats à différent hauteur avec le résultat de mesures brutes à 40 m selon le modèle de Justus et Mikhail.....	48
Figure 4.18 : Distribution de Weibull et fréquences selon le modèle modifiée de Justus.....	49
Figure 4.19 : Tracés comparatifs des résultats à différent hauteur avec le résultat de mesures brutes à 40 m selon le modèle modifiée de Justus.....	50
Figure 4.20 : Distribution de Weibull et fréquences selon le modèle modifiée de Mikhail.....	51

Figure 4.21 : Tracés comparatifs des résultats à différent hauteur avec le résultat de mesures brutes à 40 m selon le modèle modifiée de Mikhaïl.....	51
Figure 4.22 : Erreur relative à différents hauteurs selon la loi logarithmique.....	53
Figure 4.23 : Erreur relative à différents hauteurs selon la loi de puissance.....	53
Figure 4.24 : Erreur relative à différents hauteurs selon la loi de puissance 1/7.....	54
Figure 4.25 : Erreur relative à différents hauteurs selon la loi de puissance modifiée.....	54
Figure 4.26 : Erreur relative à différents hauteurs selon la loi de puissance à coefficient variable.....	55
Figure 4.27 : l'erreur relative à différents hauteurs selon le Modèle de Justus et Mikhaïl.....	56
Figure 4.28 : l'erreur relative à différents hauteurs selon le Modèle modifie de Justus.....	56
Figure 4.29 : Erreur relative à différents hauteurs selon le Modèle modifie de Mikhaïl.....	57
Figure 4.30 : Comparaison des profils du vent à partir l'extrapolation de la vitesse moyenne que z varie de 2 à 40 m par différent modèles à court terme.....	57
Figure 4.31 : Comparaison des profils du vent à partir l'extrapolation de la vitesse moyenne que z varie de 2 à 40 m par différent modèles à long terme.....	58
Figure 4.32 : Le profile verticale du vent à partir l'extrapolation verticale de la vitesse moyenne que z varie de 10 à 40 m par le modèle adéquat Justus et Mikhaïl.....	59

Liste des tableaux

Tableau 2.1. Exemples d'ordre de grandeur de la rugosité z_0	15
Tableau 3.1 : Modèles choisies pour l'étude à court terme.....	29
Tableau 3.2 : Modèles choisies pour l'étude à long terme.....	29
Tableau 3.3 : Fiche technique de la V80-2,0 MW [50].....	32
Tableau 4.1 : La variation des vitesses max à différent hauteur.....	35
Tableau 4.2 : Fréquences de la vitesse (mesures brutes) à chaque hauteur.....	36
Tableau 4.3 : Paramètres du site à partir la mesure brute.....	38
Tableau 4.4 : Modes des distributions selon la loi logarithmique.....	41
Tableau 4.5 : les paramètres de Weibull selon la loi logarithmique.....	41
Tableau 4.6 : Modes des distributions selon la loi de puissance.....	42
Tableau 4.7 : les paramètres de Weibull selon la loi de puissance.....	42
Tableau 4.8 : Modes de distribution selon la loi de puissance 1/7.....	44
Tableau 4.9 : les paramètres de Weibull selon la loi de puissance 1/7.....	44
Tableau 4.10 : Les valeurs maximales de la vitesse pour la loi de puissance modifiée.....	45
Tableau 4.11 : les paramètres de Weibull selon la loi de puissance modifié.....	45
Tableau 4.12 : Modes de la distribution de la vitesse pour la loi de puissance à coefficient variable.....	47
Tableau 4.13 : Paramètres de Weibull selon la loi de puissance à coefficient variable.....	47
Tableau 4.14 : les paramètres de Weibull selon le modèle de Justus et Mikhaïl.....	49
Tableau 4.15 : les paramètres de Weibull selon le modèle modifiée de Justus.....	50
Tableau 4.16 : les paramètres de Weibull selon le modèle modifie de Mikhaïl.....	52
Tableau 4.17 : Erreurs relatives des paramètres de Weibull selon les modèles d'extrapolation à court terme.....	52
Tableau 4.18 : Erreurs relatives des paramètres de Weibull selon les modèles d'extrapolation à long terme.....	55
Tableau 4.19 : Paramètres du site à la hauteur de 60 m.....	60

Nomenclature

A	: Surface de la roue	m^2
C	: Facteur d'échelle de Weibull	$m s^{-1}$
C_p	: Coefficient de puissance	
$\langle E \rangle$: Densité d'énergie moyenne récupérable sur une année	$MWh m^{-2}$
Er	: Erreur relative	
$F(V)$: Fréquence cumulée de la distribution de Weibull	
L	: Longueur de Monin-Obukov	m
LL	: Fonction de vraisemblable	
$\langle P \rangle$: Puissance énergétique éolienne moyenne disponible,	W
$\langle P_{Max} \rangle$: Puissance récupérable par la roue	W
$\langle P_r \rangle$: Densité de Puissance récupérable par la roue	$W m^{-2}$
$\langle P_u \rangle$: Densité de Puissance éolienne utile	$W m^{-2}$
$\langle P_e \rangle$: Densité de Puissance éolienne réellement utilisable	$W m^{-2}$
P_n	: Puissance nominale	W
$P_{théorique}$: Puissance calculée à la vitesse nominale	W
Pr	: Nombre de Prandtl	
Q^*	: Echange radiatif net	$W m^{-2}$
\bar{T}, T_{air}	: Température ambiante	K
$\langle V \rangle$: Vitesse moyenne du vent	$m s^{-1}$
V, V_x	: Vitesse du vent	$m s^{-1}$
$V_{weibull}$: Vitesse du vent estimée avec le modèle de Weibull	$m s^{-1}$
V_i, V_n, V_s	: Vitesses de démarrage, nominale et d'arrêt	$m s^{-1}$
V_1	: Vitesse du vent au niveau z_1	$m s^{-1}$
V_2	: Vitesse du vent au niveau z_2	$m s^{-1}$
$\langle V_u \rangle$: Vitesse moyenne utile	$m s^{-1}$
W	: Composante verticale de la vitesse du vent	m
ff_0	: Fréquence de vents calmes	
$f(V)$: Fréquences des vitesses moyennes tri horaires	
g	: Accélération de la pesanteur	ms^{-2}
k	: Facteur de forme de Weibull	
m	: Exposant d'extrapolation du facteur d'échelle	
n	: Exposant de la loi de puissance	
q^*	: Echelle d'humidité	
u^*	: Vitesse de frottement	
z_g	: Moyenne géométrique de l'altitude	m
z, z_1, z_2	: Altitude	m
z_0	: Rugosité du sol	m
z_r	: Hauteur de référence égale à 10	m
Γ	: Fonction gamma	
Γ^n	: Fonction gamma normalisée	
T	: Températures	K
ψ_H	: Fonction implicite de la chaleur	
ψ_M	: Fonction implicite du moment	
me	: exposant de la loi de puissance	

ψH : Fonctions universelles de la chaleur
 k : Constante de Von-Karman

ρ : Masse volumique de l'air

kgm^{-3}

Table des matières

Résumé	
Dédicaces	
Remerciements	
Liste des Figures	
Liste des tableaux	
Nomenclature	
Table des matières	
Introduction Générale	1
Chapitre 1 Etat de l'art.....	4
1.1. Introduction.....	5
1.2. Travaux réalisés dans le domaine	5
1.3. Conclusion	12
Chapitre 2 Modélisation	13
2.1. Introduction.....	14
2.2. Potentiel Energétique Eolien	14
2.2.1. Méthode du maximum de vraisemblance	14
2.3. Profil de vent et ses caractéristiques, [40]	15
2.3.1. Stabilité et instabilité	16
2.3.2. La longueur de Monin-Obukhov [41]	18
2.4. Extrapolation verticale des paramètres du vent	18
2.4.1. Extrapolation à court terme	18
2.4.1.1. Justus C.G. et Mikhaïl (Loi logarithmique), [42]	18
2.4.1.2. Loi de puissance 1/7 [42].....	19
2.4.1.3. Loi de puissance [42]	19
2.4.1.4. Loi de puissance modifiée	20
2.4.1.5. Loi à coefficient variable	20
2.4.2. Extrapolation à long terme	20
2.4.2.1. Modèle d'extrapolation de Justus et Mikhaïl, [7]	20
2.4.2.2. Modèle modifié d'extrapolation de Justus, [7].....	21
2.4.2.3. Modèle modifié d'extrapolation de Mikhaïl, [13]	21
2.4.2.4. Modèle d'extrapolation de Spéra et all, [13]	21
2.5. Energie électrique produit par un aérogénérateur [43].....	22
2.5.1. Principe de fonctionnement de l'aérogénérateur :	22
2.5.2. Les facteurs selon le calcul de puissance [43]	22
2.5.2.1. Formule de Betz.....	22

2.5.3. Zones de fonctionnement de l'éolienne	23
2.6. Conclusion	24
Chapitre 3 Méthodologie et Simulation.....	25
3.1. Introduction.....	26
3.2. Présentation du site de mesure.....	26
3.3. Mat de mesures et mesures collectées	27
3.4. Modelés utilisés	28
3.4.1. Modèle à Court terme	28
3.4.2. Modèles à long terme.....	29
3.4.3. Calcul d'erreur relatif.....	30
3.5. Simulation développée	30
3.5.1. Traitement des données de mesure.....	30
3.5.2. Présentation du programme de calcul développé	30
3.5.3. Organigramme de calcul.....	31
3.6. Application à un aérogénérateur de puissance	32
3.6.1. L'éolienne utilisée	32
3.6.2. Les caractéristiques de l'éolienne	32
3.7. Conclusion	33
Chapitre 4 Résultats et Discussion	34
4.1. Introduction.....	35
4.2. Etude et Traitement des données brutes de la vitesse du vent	35
4.2.1. Variation temporelle de la vitesse mesurée.....	35
4.2.2. Fréquences et distribution de Weibull pour chaque hauteur	36
4.3. Extrapolation verticale des paramètres du vent	39
4.3.1. Extrapolation à court terme	39
a- Loi logarithmique	39
b- Loi de puissance	41
c- Loi de puissance 1/7	43
d- Loi de puissance modifiée	44
e- Loi de puissance à coefficient variable	46
4.3.2. Extrapolation à long terme	47
a- Modèle de Justus et Mikhaïl.....	47
b- Modèle modifiée de Justus.....	49
c- Modèle modifiée de Mikhaïl	50
4.4. Choix du modèle adéquat	52

4.4.1. A court terme	52
4.4.2. A long terme	55
4.5. Vérification les résultats du modèle adéquat par le tracé de profil du vent 57	
4.5.1. Les profile du vent à partir les modèles à court terme.....	57
4.5.2. Les profile du vent à partir les modèles à long terme.....	58
4.6. l'utilisation de nos résultats.....	58
4.6.1. Profil du vent.....	58
4.6.2. La puissance énergétique éolienne.....	59
4.7. Conclusion	60
Conclusion Générale.....	61
Références Bibliographique	63



Introduction Générale



Mise à part la chaleur du centre de la Terre, toute énergie sur notre planète provient soleil. Nous en dépendons même si nous, croyons nous en affranchir quand nous recourons à l'énergie issue de la fission nucléaire. Le charbon, le pétrole, le gaz naturel ne sont que de l'énergie solaire stockée, en quantité limitée, sur des millions et des millions d'années par la vie. Le bois est aussi de l'énergie solaire mise en réserve. En brûlant du bois, les hommes la libèrent, la transmettent, ils ne la créent pas. Mais l'énergie dilapidée de ces millions de tonnes de charbon, de pétrole, de gaz et de bois n'est pas sans conséquences. C'est pour cela qu'il faut se concentrer sur celles qui sont renouvelables et dont l'exploitation nécessite le développement des technologies de conversion pour la production d'une énergie mécanique ou électrique. [1]

Au vu la crise énergétique, la recherche de solution intermédiaire semble urgente. En Algérie le pétrole subsiste toujours mais pour faire face à son imminence épuisement, le gouvernement a mis en place un programme en énergie renouvelable qui prévoit d'installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22.000 MW à l'horizon 2030 pour le marché national, avec le maintien de l'option de l'exportation comme objectif stratégique. Si les conditions du marché le permettent, à travers ce programme, l'Algérie compte se positionner comme un acteur majeur dans la production de l'électricité à partir des filières photovoltaïque et éolienne en intégrant la biomasse, la cogénération, et la géothermie au-delà de 2021, le solaire thermique. Ces filières énergétiques seront les moteurs d'un développement économique durable à même d'impulser un nouveau modèle de croissance économique. A ce jour, la capacité installée est de l'ordre de 299 MW dont 10 MW en éolien. Il s'agit de la ferme expérimentale de Tiberkanine d'Adrar de puissance de 10 MW, [2].

L'Algérie possède le potentiel solaire le plus intéressant du monde, mais son exploitation à grande échelle nécessite le développement de technologies de conversion appropriée et rentable. Mais si on compare le prix du kWh produit par énergie solaire, a celui de l'éolien, on remarque que celui produit par la source éolienne est plus faible.

Dans le présent travail, nous nous intéressons à l'énergie éolienne, sa disponibilité et ses caractéristiques telles que la puissance et son estimation pour une région donnée à partir de mesures brutes des vitesses du vent.

En effet, En Algérie, les paramètres du vent sont généralement mesurés à la hauteur normalisée de 10 m au sein des stations météorologiques de l'ONM. Pour obtenir des données relatives à la hauteur désirée, tel que la hauteur d'une hélice, il faut soit mesurer les paramètres vent au niveau de l'hélice soit à partir de la mesure directe ou par extrapolation verticale de mesures prélevées à 10 m du sol par les services météorologiques vers la hauteur désirée. La première méthode est plus précise mais nécessite une longue période de mesure.

Dans la littérature deux méthodes sont identifiées, l'extrapolation à long terme et celle à court terme. [3]

L'extrapolation à court terme signifie l'extrapolation des mesures brutes du vent vers la hauteur désirée et l'extrapolation à long terme porte sur l'extrapolation des facteurs de weibull caractérisant le site traité.

La présente étude porte sur la comparaison des deux méthodes précitées à partir de modèles empiriques données par littérature.

Pour cela, les données mesurées sur le site de Ksar El Chellala ont été utilisées. En effet cette station est muni d'un polynôme de mesure de 7 Niveaux à savoir : (2 m, 10 m, 20 m, 30 m et 40 m): Différents modèles d'extrapolation trouvées dans la littérature ce qui a permis de testée. Les vitesses estimées ont été comparées avec les mesures pour déterminer le modèle le plus adéquat pour l'extrapolation verticale à court ou à long terme.

Le document est départagé en une introduction, quatre chapitres et une conclusion. Le premier chapitre porte sur la partie bibliographie les travaux qui ont été fait dans le domaine de l'extrapolation des paramètres du vent. Le deuxième concerne la présentation des différents modèles développés dans la littérature en spécifiant leurs différences ou complémentarités. Le troisième chapitre porte sur méthodologie et la simulation du programme développé sous MatLab. Et enfin les résultats et la discussion sont donnés au chapitre quatre.



Chapitre 1
Etat de l'art



1.1. Introduction

Pour caractériser les ressources en énergie éolienne, il y a lieu de distinguer l'énergie éolienne disponible, qui est l'énergie que pourrait transformer une éolienne idéale de rendement unité, et l'énergie éolienne récupérable, qui dépend des caractéristiques du système énergétique éolien.

Un certain nombre de caractéristiques du vent sont susceptibles d'avoir une influence sur la conception et le rendement des éoliennes, en particulier les lois de distribution de la vitesse et de la direction, les variations avec la hauteur, l'influence de la topographie, et les lois statistiques concernant les rafales et les valeurs extrêmes.

Un nombre de relations empiriques ont ainsi été développées. La théorie de similitude, établie par Monin-Obukov (1954), [4] constitue la base de tous les travaux sur le profil du vent et l'extrapolation verticale de la vitesse. Une étude statistique des données du vent (vitesse et direction) devra être utilisée pour le calcul du potentiel énergétique éolien disponible sur un site donné. Ceci permettra le choix des sites ventés susceptibles de recevoir des systèmes énergétiques éoliens.

On a abordé le chapitre par les travaux sur le profil du vent et sur l'extrapolation verticale ainsi que sur l'extrapolation des paramètres de Weibull. En plus des travaux de recherche sur le calcul du potentiel énergétique éolien en Algérie pour quantifier le gisement éolien dans ce pays.

1.2. Travaux réalisés dans le domaine

Lettau, [5] avait supposé l'accélération constante. Le modèle développé n'est pas exacte, mais il permet une meilleure compréhension de la turbulence atmosphérique. L'analyse contient en effet des étapes fondamentales sur lesquelles on peut se base et qui ont permis de perspectives de recherche sur la variation du profil de vitesse du vent et de température, le flux de chaleur, la structure de l'atmosphère en dehors des limites de la surface. Ses questions ont donné lieu à plusieurs travaux de recherche sur la théorie statistique de la turbulence.

Nobutaka Menji and Joost A. Businger en 1971, [6] ont été parmi les premiers à étudier les divergences verticales de la vitesse du Vent dans la couche atmosphérique de la surface.

Les travaux les plus connus pour l'extrapolation des vitesses du vent et des paramètres de weibull sont ceux cités par la plupart des auteurs à savoir.

Modèle d'extrapolation de Justus et Mikhaïl développé en 1976 [7], suivi par celui de la loi de puissance [8], la loi de puissance 1/7 [9], et la loi de puissance modifiée [9], H. Nfaoui et al. [10] simplifient l'exposant est à coefficient variable en fonction de la rugosité. A été exposé dans un établissement marocain [11], pour ce qui concerne l'extrapolation à court terme.

Pour le long terme, les travaux de Justus et Mikhaïl de 1967 [7], suivi du modèle modifiée de Justus [12] puis de Mikhaïl [13] les modèles ont fait objet de plusieurs travaux que l'on va citer ultérieurement.

Partant de la théorie de similitude de Monin-Obukov [4] et des travaux de Dryer 1974 et Paulson 1970, N. Kasbadji Merzouk et al, [14] ont montré que pour des classes de stabilité atmosphérique définies, les tracés des profils verticaux de la vitesse du vent

pour des conditions atmosphériques instables, est fortement turbulente et que le profil tend vers l'uniformisation. Dans le cas où les conditions sont stables le profil est assez proche du cas où les données sont traitées globalement sans distinction des classes de stabilité. Les résultats montrent que le passage de la classe de stabilité stable à instable se fait lorsque l'éclairement solaire atteint durant la journée à 14% de son maximum. Ils démontrent aussi que le profil vertical de la vitesse du vent varie selon la classe de stabilité de l'atmosphère et que l'hypothèse de neutralité posée par plusieurs auteurs n'est pas fondée.

B. Lange et al en 2002 [15] ont utilisé la théorie de Monin-Obukov pour déterminer le profil vertical du vent dans des régions offshore.

N. Kasbadji et al, en 2003 [14], ont étudié les différentes formules empiriques établies pour l'extrapolation verticale de la vitesse du vent ont été testées puis comparées aux mesures relevées sur un pylône de 50 mètres installé à Ksar El Chellala. Les résultats montrent que la loi de puissance est la plus adaptée pour un climat semi-aride. La corrélation des données expérimentales en appliquant ce modèle aboutit à un exposant légèrement inférieur (écart inférieur à 3%). Par ailleurs, si une base de données suffisante est constituée, il serait plus intéressant d'établir des formules permettant l'extrapolation des paramètres de Weibull attendu que ces derniers soient disponibles pour une grande partie du pays.

G. P. van den Berg en 2003, [16] ont utilisé l'équation logarithmique pour l'approximation de profil du vent dans la couche limite turbulente pour des conditions neutres de l'atmosphère.

I. A. Pérez et al en 2005, [17] ont fait une analyse de paramétrage du profil du vent dans la basse atmosphère en l'utilisant le modèle de la loi de puissance. Ils ont signalés que la connaissance de la variation temporelle et spatiale du vent est importante afin d'obtenir des calculs précis du potentiel énergétique éolien. La meilleure méthode d'estimation implique la mesure directe de la vitesse du vent qui, cependant, ce n'est pas toujours possible. Dans de tels cas, une bonne représentation du profil du vent est nécessaire. Un sodar RASS situé dans le nord de l'Espagne a été utilisé dans la présente étude. Ce dispositif a fourni une large base de données de vitesses moyennées sur 10 min (Août 2002 à Janvier de 2004). Les moyennes horaires ont été calculées chaque mois, les profils de vitesse du vent étaient stables pendant la journée, surtout en été, en raison de la convection produite par la surface de la terre. Cependant, la condition stable favorise le mouvement horizontal et les valeurs de la vitesse du vent augmentent avec la hauteur la nuit. Les lois en puissance et logarithmiques ont été évaluées à partir des profils verticaux de moyennes horaires de la vitesse du vent. L'exposant de la loi de puissance a donné des moyennes horaires supérieures de 0,5 pendant la nuit et inférieures à 0,2 au cours de la journée. Un modèle simple a été proposé pour l'estimation des valeurs de la vitesse qui consiste en une addition de trois fonctions harmoniques sur des périodes d'une année, un jour et demi-journée. Les moyennes horaires de la vitesse du vent ont été estimées avec succès pour les hauteurs désirées, et que l'ajustement est meilleur pour la loi de puissance.

N. Kasbadji-Merzouk et al, en 2007, [28] utilisant les modèles d'extrapolation verticale des paramètres de Weibull pour l'estimation du potentiel récupérable sur un site donné.

Afin d'estimer la puissance énergétique réellement récupérée par l'aérogénérateur un modèle semi-empirique a été développé pour l'extrapolation verticale des paramètres de Weibull en fonction des classes de stabilité atmosphérique, à savoir : stable, instable et neutre. En ignorant les classes de stabilité, on aboutit à une expression de l'exposant assez proche de celle trouvée pour le cas neutre, les expressions d'extrapolation verticale des paramètres de Weibull k et c ont permis la détermination de la vitesse moyenne et de la puissance récupérable en fonction de l'altitude pour une zone semi-aride.

En 2008 R. Istchenko et B. Turner [19] ont effectué une étude sur la dépendance du cisaillement du vent envers la stabilité de la couche limite en utilisant la théorie de la similitude de Monin-obukhov et les profils logarithmiques modifiés du vent. Les mesures de l'évaluation de la ressource du vent étant insuffisantes pour évaluer la stabilité. Ils montrent que les déductions de la stabilité est possibles en utilisant les mesures d'instrumentation spécifique installé à plusieurs niveaux sur les tours météorologiques. Ils ont déduit que l'utilisation des paramètres de la loi de puissance est souvent suffisante en dépit des variations de la stabilité sur la même journée. L'effet des différentes méthodes d'extrapolations des vitesses du vent sur les estimations de l'énergie du vent sont démontrés en utilisant des mesures de 2007 à partir d'une tour de contrôle située à 50m d'altitude. La plus part des variations liées à la stabilité dans l'extrapolation de la vitesse du vent sont testés par valeurs du paramètre de cisaillement α ajusté selon les périodes de la journée (méthode TOD). En effet, la plus part des améliorations possibles pourraient être réalisé pour des mesures situées en dessous de l'intervalle d'extrapolation, a des hauteurs ou les mesures peuvent être réalisé en pratique. Une tentative initiale pour plus d'amélioration de l'extrapolation en utilisant une correction linéaire pour des différences de températures verticales a donné pour résultats des améliorations négligeables.

M. C. Holtslaget al 2012, [20] ont montré que la stabilité atmosphérique influence fortement le cisaillement du vent et qu'elle doit être considérée lors des calculs pour le design des turbines. Il teste plusieurs méthodes pour obtenir la stabilité atmosphérique caractérisé par la longueur d'Obukhov L . et ce pour corriger le profil du vent logarithmique (4 méthodes permettant d'obtenir L et 5 pour corriger le profil logarithmique du vent). Les cas de stabilité ou instabilité sont inclus dans l'analyse, (deux pour des conditions instables et trois pour des conditions stables). Les quatre méthodes utilisées pour estimer la stabilité résultent de la variation de PDF.

O. O. Ajayi et al, en 2013, [21] ont travaillé sur les caractéristiques dues profil du vent en utilisant de deux méthodes, à savoir la loi logarithmique et la loi de puissance. L'analyse du potentiel de production d'électricité à partir du vent à Kano, a été réalisée. Vingt et un ans de vitesse des vents moyens mensuels. Mesurées à une hauteur de 10 m, ont été utilisées.

E. Päsckke et al, en 2015, [22] ont tracé le profil vertical du vent en utilisant une année de mesures prélevées à plusieurs niveaux sur 1200 m d'altitude, à l'aide d'un Lidar. Les mesures ont été comparées avec les données de référence obtenue à partir d'un radar profileur de vent et à partir de mesures de radiosondes. La vitesse du vent pour l'ensemble de données inter comparaison est 8.2m/s1.

Dans la même année 2015 N. Cheggaga et al, [23] a étudié la faisabilité d'un parc éolien et s'est intéressé au profil du vent et sa variation. Ce travail décrit l'apport des réseaux de neurones à la modélisation du vent. Il s'agit d'effectuer à partir des données d'observations une description de la variation verticale de la vitesse du vent. L'impact visé est de générer des profils de vent utiles à la conception et au choix des générateurs éoliens en réduisant les incertitudes sur l'estimation de la productible éolienne. Le modèle conçu, basé sur les réseaux de neurones à structure multicouche a permis d'élaborer le profil vertical de la vitesse du vent suivant deux scénarios dont le plus favorable correspond à l'utilisation de réseaux de neurones ou chaque réseau correspond à un pas d'altitude. Cette approche a permis une amélioration considérable des erreurs de prédiction obtenues lors de l'extrapolation de la vitesse du vent, et présente l'avantage majeur de procurer avec exactitude le profil vertical du vent à basse altitude.

On remarque que tous les travaux précédents concernent le profil du vent et les modèles d'extrapolation de la vitesse à court terme. Certains auteurs ont utilisé ces modèles pour établir les atlas vent de l'Algérie.

N. Kasbadji Merzouk, En 1999 [24] a publié deux atlas éolien de l'Algérie à 10m et à 25m en utilisant 10 années de mesures de 26 stations météorologique. Les vitesses du vent ont été traitées et extrapolées de 10 à 25 m à l'aide de la loi de puissance de Mikhaïl et al. [16]. L'auteur a établi la carte du vent de l'Algérie, à l'aide d'un programme de traitement de données des mesures de la vitesse du vent et leurs extrapolation pour la détermination de la vitesse moyenne annuelle à plusieurs altitudes. Les résultats ont montré qu'en Algérie, les vitesses du vent varient entre 1 et 5,5 m/s à 10 mètres du sol et que ces dernières passent de 1 à 7 m/s, à 25 mètres du sol. Elle a conclu que les applications énergétiques deviennent intéressantes, lorsque les éoliennes sont installées à des altitudes supérieures ou égales à 25 mètres du sol. Les cartes de la vitesse du vent établies, permettent l'identification des régions prometteuses en matière d'énergie éolienne.

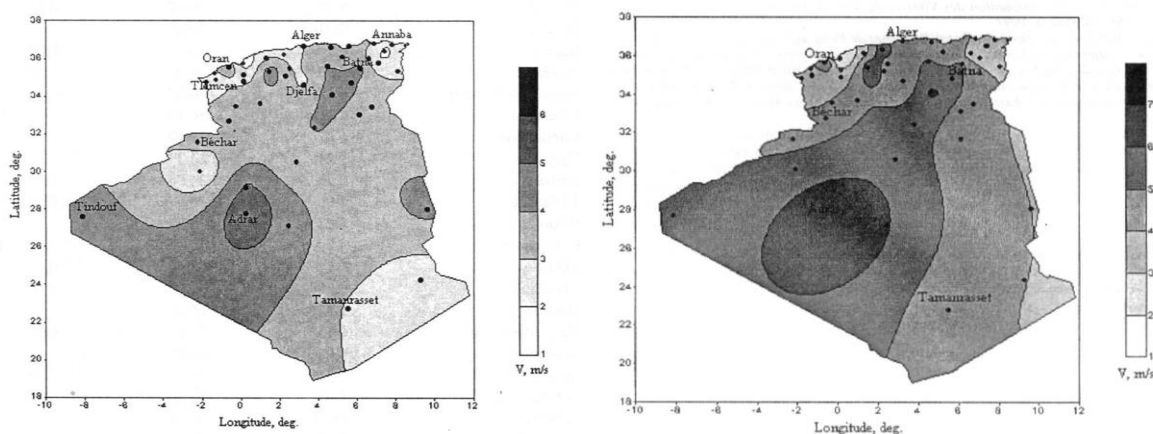


Figure 1.1 : Tracé de la carte des vents à 10 et 25 m d'altitude.

R. Maouedj et al, en (2010), [25] ont établi l'étude du gisement éolien de six sites algériens, par extrapolation de la vitesse du vent d'une hauteur standard de 10m à 30m à 50m en utilisant les lois d'extrapolation verticale. Les caractéristiques de la vitesse du vent et le potentiel éolien des sites ont été déterminées en appliquant la distribution de Rayleigh. Cette étude a permis de déterminer que la vitesse moyenne annuelle des sites

pour une hauteur standard de 10m, l'influence de la température sur la densité de l'air et de ce fait sur la puissance du vent. Ils ont introduit la correction de Widely sur la densité de l'air, la densité de l'air diminue avec l'augmentation de la hauteur du site étudié. Les valeurs annuelles de la puissance du vent corrigées, sont plus faibles a nombré que celles qui ne le sont pas.

S. M. Boudia et al, en 2012 [26] ont effectué le même travail en extrapolant les paramètres de weibull à l'aide du modèle de Justus des mesures prélevées quatre région Tebessa Naama Msila et Ksar-Elchallala pour déterminer le potentiel éolien dans ces régions. Le but de cette étude est l'investigation mensuelle, saisonnière et annuelle en termes d'énergie éolienne Après une étude temporelle des paramètres de Weibull, ils ont procédé à leur extrapolation verticale, ainsi que de la vitesse moyenne du vent à une hauteur de 50m. Ensuite une analyse mensuelle, saisonnière et annuelle de l'efficacité énergétique a été calculée pour une éolienne type d'une puissance de 600 kW. Les résultats donnent la Région de MSila étant la mieux ventée des quatre, avec une vitesse moyenne annuelle $V=4$ m/s et une production énergétique annuelle égale à 2.4 GWh/année. De nouveaux travaux ont été réalisés pour déterminer les différentes méthodes pour l'extrapolation verticale des paramètres du vent ou des méthodes pour estimer ces paramètres.

S. A. Akdag et A. Diler, en 2009 [27] ont testées les méthodes de détermination des paramètres de weibull, la méthode graphique, méthode maximale de la vraisemblance, méthode du moment et la méthode de densité de puissance. Ils ont déduit que cette dernière était la plus acceptable pour estimer les paramètres de weibull et la détermination de la vitesse et du potentiel éolien disponible sur un site donné les valeurs exact. Dans cette étude, une nouvelle méthode a été développée pour estimer les paramètres de distribution Weibull pour les applications de l'énergie éolienne. Cette nouvelle méthode est appelée la méthode de densité de puissance (PD). Les méthodes graphiques, maximum de vraisemblance et des méthodes du moment, sont revues et une comparaison entre ces méthodes et méthode de PD est réalisée. Aussi pour démontrer la précision de la méthode PD, les comparaisons sont effectuées sur la base de la densité de puissance et la moyenne des résultats d'estimation du vent des études précédentes. Les résultats de cette étude indiquent cette méthode PD est une méthode adéquate pour estimer les paramètres de Weibull et il pourrait avoir une meilleure aptitude que d'autres méthodes.

M. A. Lackner et al en 2010[28], ont publié une nouvelle méthode pour l'estimation de vitesse du vent à la hauteur du moyeu. Il utilise des données à court terme et présente une méthode empirique simple pour prédire le cisaillement lors de l'extrapolation. Ils ont conclu que l'erreur d'estimation diminue lorsque la série de mesure utilisée augmente. La valeur vraie dans cette méthode se trouve dans l'incertitude réduite qu'ils produisent et dans les prédictions de l'extrapolation du cisaillement qui, prévoit de façon substantielle plus de confiance dans les prédictions des vitesses à la hauteur du moyeu.

M. Elamouri et al, en 2011 [29] a étudié la rentabilité de la ferme du vent du Sidi Daoud - Tunisie en extrapolant les vitesses mesurées à l'ide de la loi logarithmique et la loi de puissance, du point de mesure à la hauteur du noyau de la machine.

G. Gualtieri et S. Secci en 2012 [30] ont aussi étudié les méthodes d'extrapolation de la ressource du vent à la hauteur du moyeu de la turbine basée sur la loi de la puissance. Ils ont comparé deux méthodes extrapolation ((I) l'extrapolation de mesure prélevée toutes les heures et (ii) l'extrapolation de la distribution the Weibull). Les modèles testées toutes les deux relatives à la loi de puissance. Ces modèles d'extrapolation ont été testés sur un emplacement côtier et pour une topographie complexes en Toscane, Italie et ceci afin déterminer le rôle de la stabilité atmosphérique et de la rugosité de surface (Z_0), ainsi que la variabilité du temps sur l'estimation de la vitesse du vent. Ce travail a démontré que l'extrapolation des paramètres de weibull à long terme est plus avantageuses pour les études d'énergie éolienne par rapport à extrapolant à court terme.

P. A. Costa Rocha et al en 2012 [31] ont comparé sept méthodes numériques de détermination des paramètres de Weibull pour la génération de l'énergie du vent dans la région nord-est du Brésil. Les méthodes sont : Méthode graphique, Méthode maximale de la vraisemblance, Méthode du facteur du motif de l'énergie, Méthode du moment, Méthode empirique, Méthode maximale modifiée de la vraisemblance, Méthode équivalente de l'énergie. Ils ont concluent que la méthode équivalente de l'énergie est une méthode efficace pour les paramètres de k et C lorsqu'il s'agit zone côtière et que la méthode la moins efficace est la graphique. Par ailleurs, ils concluent que les méthodes numériques qui utilisent les itérations mathématiques pour estimer les paramètres de k et C présentent de faibles erreurs. Par conséquent, ils sont recommandés pour une bonne précision et afin de fournir les résultats plus exacts. Ils ont observé une tendance croissante dans l'efficacité concernant l'ajustement de la courbe avec l'histogramme de la vitesse du vent quand la déviation standard est faible.

Z. Sen et al en 2012 [32] ont utilisé la loi de puissance améliorée pour l'extrapolation verticale de la vitesse du vent. Dans l'étude, une formule améliorée de l'extrapolation verticale de la vitesse du vent est dérivée sur la base de la théorie de la perturbation en considérant la loi de la puissance du vent des facteurs de Weibull. Dans la méthodologie proposée les différentes valeurs maximales de la vitesse du vent a différentes hauteurs, sont considérées ainsi que, leurs déviations standards et le coefficient de corrélation. L'application de la méthodologie présentée a été réalisée pour les mesures de la vitesse du vent a Karaburun/Istanbul, Turquie où les mesures de la vitesse du vent prises toute les heures, sont disponibles pour trois différentes hauteurs au-dessus de la surface de la terre. Donc, une simple méthodologie basée sur la théorie de perturbation est présentée pour en extraire une loi de puissance améliorée pour l'extrapolation verticale de la vitesse du vent. La distribution de la probabilité de Weibull. Il est observé que contrairement à l'approche classique, les vitesses du vent moyennes à des élévations différentes, les déviations standards et le coefficient de corrélation doivent être pris en considération, et influent sur l'extrapolation car la loi de puissance ne tient pas compte de l'instabilité atmosphérique.

M. Kazet et all, en 2013, [33] ont présenté une étude permettant d'apporter une aide efficace à la prise des décisions concernant la planification et la réalisation de projets à énergie éolienne. Ils commencent par la détermination des différents paramètres liés au vent, distribution de Weibull, puis le traitement et la simulation numérique des données réelles relatives au vent collectées pendant douze mois, afin de fournir des prédictions sur un site de la ville de Ngaoundéré. Ils évaluent son potentiel éolien, sa prédiction de l'énergie électrique produite, Enfin, Ils déterminent la direction des éoliennes dans le

site et procèdent à une analyse de la turbulence du vent. Enfin, les valeurs des paramètres mesurées et calculées statistiquement sont très proches des valeurs issues de l'approximation par la modélisation mathématique de la distribution de Weibull, ce qui valide l'usage de ce modèle à des fins de prédictions.

J. F. Newman et P. M. Klein en 2014 [34] ont aussi étudié les impacts de la stabilité atmosphérique sur l'exactitude des Méthodes de l'extrapolation de la vitesse du vent, les données ont été utilisées pour classifier la stabilité atmosphérique et pour développer la loi de puissance en fonction de la stabilité. La méthode des théories basées sur la similitude a été aussi testée et comparés à la loi de puissance. Les résultats montrent que la loi de puissance est plus performante que la méthode de la théorie de similitude surtout sous des conditions stable et peut être facilement appliqué aux données de la vitesse du vent pour différentes saisons.

D. Khalfa et al, en 2014, [35] ont démontré que l'étude des modèles du cisaillement du vent leurs fiabilité est une issue cruciale pour la prédiction de la vitesse moyenne du vent a différentes hauteurs de moyeu de turbines et du rendement machines. Les modèles empiriques d'extrapolation ont était développées pour des conditions et sites spécifiques. L'étude portent aussi sur l'évaluation de plusieurs lois d'extrapolation de la vitesse du vent (six lois) en comparant les résultats analytiques avec les données réelle pour deux sites méthodologiques différent, pour différentes altitudes et différents périodes de mesures. Les auteurs ont conclu que si les conditions météorologique sont extrêmes la loi d'extrapolation de la vitesse du vent la plus adaptée est la loi ajustée et que l'augmentation de l'altitude n'entraîne pas à l'augmentation de facteur k. et que les valeurs du calcul de l'énergie en utilisant les lois de l'extrapolation de la vitesse du vent ne sont jamais supérieurs aux données réelles. Par ailleurs, les deux lois de l'extrapolation (loi logarithmique et loi de 1/7 de puissance) garde la même forme de distribution de données autour de l'altitude de référence ($K=\text{constant}$), et présentent une réduction de la distribution et entraînent de grand facteurs de K.

F. A. Hadi, 2015, [36] ont extrapolé la vitesse du vent dans le but de déterminer la densité de puissance et le tracé la distribution des vitesses du vent à différentes hauteurs à l'aide de la loi de puissance et loi logarithmique. Les résultats ont était comparés avec les données mesurées par des capteurs positionnés aux hauteurs différentes pour le but de connaître la meilleure méthode de la représentation. Les capteurs sont installés à 10, 30,52m de hauteur du sol du site de la région AL shehabi en Iraq. Les résultats et les données observées ont été comparés avec la carte de ressource du vent de l'Iraq, afin de vérifier l'exactitude des données. Il a été trouvé que l'extrapolation de la vitesse du vent donne des résultats plus acceptables comparé aux (loi logarithmique et loi de puissance). Ils ont trouvé qu'en cas de disponibilité des donnés d'une certaine hauteur et de l'indisponibilité des données sur une hauteur plus élevée que la précédente l'extrapolation de la vitesse du vent peut être effectué en utilisant l'extrapolation distribution des probabilités.

L'étude de E. G. Lázaro et al, en 2016 [37] s'est focalisé sur les paramètres de Weibull pour caractériser la fonction de densité de probabilité (PDF), la sélection du nombre de composant est analyser à partir de deux critères : le critère d'information d'Akaike (AIC) et le critère d'information de Bayes(BIC). Finalement, le nombre optimale de facteurs

de Weibull est exploré à partir de paramètres définis tels que : le poids estimé, l'échelle, la forme des paramètres. Les résultats montrent que le modèle de Weibull est le plus convenable pour caractériser les données de puissance du vent et que ceci est dû aux différentes formes que prends la distribution pour représenter l'évolution de la vitesse du vent. Les résultats montrent que plus 66% de la distribution cumulée de weibull est heurrequire et que 44% sont modelés par une bi distribution de Weibull et 22% correspondent à une tri-distribution.

1.3. Conclusion

Dans ce chapitre nous présentons essentiellement les différents travaux réalisés, ainsi que les résultats obtenues des recherches, notamment, les divergences verticales du vent dans la couche atmosphérique de la surface, la détermination du profile verticale du vent dans les régions offshore en appliquant la théorie de Monin-Obukov, l'étude de différentes formules empiriques et l'utilisation de l'équation logarithmique , loi de puissance et paramètres de Weibull pour l'estimation du potentiel récupérable sur un site donné. Ces recherches comprennent aussi une étude sur la dépendance du cisaillement du vent envers la stabilité de la couche limite en utilisant la théorie de similitude de Monin-Obukov. On retrouve aussi l'apport des réseaux de neurones a la modélisation du vent, ou certains auteurs ont utilisé ces modèles pour établir les atlas vent de l'Algérie ce qui permet d'identifier les régions prometteuses en matières d'énergie éolienne.



Chapitre 2

Modélisation



2.1. Introduction

Pour l'application éolienne, la principale étape consiste à connaître localement la nature des vents de l'endroit où l'on souhaite implanter des machines. En premier lieu, les données du vent permettent de définir le potentiel du site ainsi que la nature des éoliennes à utiliser et leur répartition optimale. Mais ces données sont aussi fondamentales pour le fonctionnement de la machine (prévision à court terme etc.) [38]. Dans le présent chapitre nous allons donner les définitions de base permettant d'estimer le potentiel énergétique éolien d'un site et présenter les différents modèles d'extrapolation utilisés pour déterminer le potentiel à une hauteur désirée.

2.2. Potentiel Energétique Eolien

La densité d'énergie éolienne moyenne disponible sur un site donné par unité de temps et par unité de surface de la roue d'une éolienne s'écrit [39]:

$$\langle P \rangle = \frac{1}{2} \rho \langle V^3 \rangle \quad 2.1$$

Où ρ est la masse volumique de l'air égale en moyenne à 1.25 kg/m³ et $\langle V^3 \rangle$ la vitesse cubique moyenne du vent.

La vitesse cubique moyenne se met sous la forme :

$$\langle V^3 \rangle = C^3 \Gamma \left(1 + \frac{3}{k} \right) \quad 2.2$$

C : Facteur d'échelle (m/s)

k: Facteur de forme (sans unité)

Γ : Fonction gamma $\Gamma(x)$

La détermination de la vitesse cubique moyenne se fait à partir de l'étude statistique en utilisant la distribution de Weibull, dont la densité de probabilité est donnée par [39]:

$$f(V) = \left(\frac{k}{C} \right) \left(\frac{V}{C} \right)^{k-1} \exp \left(- \left(\frac{V}{C} \right)^k \right) \quad 2.3$$

Où $f(V)$ représente la distribution des fréquences des vitesses moyennes pour une classe donnée. La vitesse cubique moyenne est déterminée par intégration du moment d'ordre 3, soit [39]:

$$\langle V^3 \rangle = \int_0^{\infty} V^3 f(V) dV \quad 2.4$$

Il s'en suit l'expression 2.2

La fonction gamma est donnée par [6] :

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} \exp(-t) t^{x-1} dt \quad 2.5$$

La détermination de ces paramètres permet la connaissance de la distribution des vitesses pour un site donné.

2.2.1. Méthode du maximum de vraisemblance

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer les facteurs k et c dont la plus adaptée est celle de maximum de vraisemblance, [3]

La fonction vraisemblance appliquée à la distribution de Weibull s'écrit, [3]:

$$L_v = \prod_{i=1}^N f(V_i) = \prod_{i=1}^N \frac{k}{C} \left(\frac{V_i}{C}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{V_i}{C}\right)^k\right) \quad 2.6$$

On prend le logarithme, ce qui permet d'écrire

$$\log(L_v) = \sum_{i=1}^N \log k - k \sum_{i=1}^N \log C + (k-1) \sum_{i=1}^N \log V_i - \sum_{i=1}^N \left(\frac{V_i}{C}\right)^k \quad 2.7$$

L est maximale pour $(\partial L_v / \partial k) = 0$, $(\partial L_v / \partial C) = 0$, et $(\partial^2 L_v / \partial k^2) < 0$, $(\partial^2 L_v / \partial C^2) < 0$, soit :

$$\frac{\partial(\log L_v)}{\partial C} = -\frac{k}{C} N + \frac{k}{C} \sum_{i=1}^N \left(\frac{V_i}{C}\right)^k = 0 \quad 2.8$$

D'où :

$$C^k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i^k \quad 2.9$$

Par ailleurs,

$$\frac{\partial(\log L)}{\partial k} = \frac{N}{k} - N \log C + \sum_{i=1}^N \log V_i - \frac{\sum_{i=1}^N V_i^k \log V_i}{C^k} + \frac{\sum_{i=1}^N V_i^k \log C}{C^k} = 0 \quad 2.10$$

En utilisant, il vient :

$$\frac{N}{k} + \sum_{i=1}^N \log V_i - \frac{\sum_{i=1}^N \log V_i}{C^k} = 0 \quad 2.11$$

D'où :

$$\frac{1}{k} = \left(\frac{1}{C^k} \sum_{i=1}^N V_i^k \log V_i - \sum_{i=1}^N \log V_i \right) * \frac{1}{N} \quad 2.12$$

N étant le nombre total d'observations non nulles. Le système 2.6-2.12 est résolu par itérations successives en utilisant une méthode d'optimisation, (Méthode Lvenberg-Marquart sous Matlab, [3]).

2.3. Profil de vent et ses caractéristiques, [40]

A des altitudes élevées, soit environ un à deux kilomètres au-dessus du sol, l'influence de la surface de la terre sur l'écoulement du vent est pratiquement nulle. Par contre, dans les couches d'air plus basses, la friction contre la surface du terrain influe beaucoup sur la vitesse du vent. On distingue la rugosité du terrain et l'influence exercée par les obstacles avoisinants et les contours du paysage (on parle aussi de l'orographie d'un paysage). En règle générale, une rugosité forte diminue considérablement la vitesse du vent près du sol. Ainsi, les forêts et les grandes villes freinent beaucoup le vent, tandis qu'une piste d'atterrissage en béton n'influe que peu sur la vitesse du vent. Par exemple, la surface de la mer 'calme' a une rugosité encore plus faible que les pistes d'atterrissage, alors que l'herbe longue, les buissons et les arbrisseaux freinent le vent près du sol.

Le tableau 2.1 présente quelques valeurs du paramètre de rugosité z_0 correspondant à différents types de surface.

Tableau 2.1. Exemples d'ordre de grandeur de la rugosité z_0 .

Surface	Glace	Eau	Pelouse	Prairie	Blé	Mais	Foret	Ville
Z_0 (m)	10^{-5}	$4 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	$6 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-1}$ à 2	2 à 5

Le profil de vent est logarithmique (droite sur la figure 2.1. en échelle semi-logarithmique) au-dessus de la couche de rugosité (qui a pour limite inférieure la hauteur h du couvert). La hauteur de rugosité est la hauteur au-dessus de d pour laquelle la vitesse du vent serait nulle si le profil est logarithmique même dans le couvert (profil dessiné en pointillés dans la figure 2.1. ci-dessous).

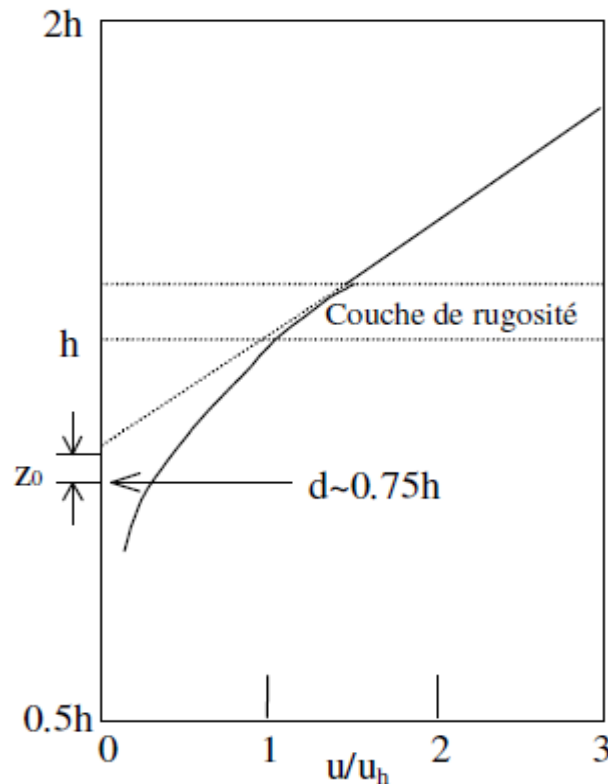


Figure 2.1 : Profil de vent moyen au-dessus d'un couvert de hauteur h .

La hauteur est représentée en échelle logarithmique et la vitesse du vent est normalisée par la vitesse u_h au sommet du couvert. La hauteur de déplacement d et la rugosité z_0 apparaissent.

Le profil de vent en conditions de neutralité thermique peut s'écrire sous la forme suivante :

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) \quad 2.13$$

Où u^* est la vitesse de frottement, k la constante de Von-Karman ($= 0,41$), z_0 la longueur de rugosité et d la hauteur de déplacement.

Les trois paramètres d'ajustement du profil logarithmique sur le profil de vent mesuré sont donc u^* , d et z_0 .

On parle de hauteur de déplacement lorsque le sol est recouvert par une végétation dense de hauteur H , alors, le niveau du sol se trouve surélevé d'une hauteur $d < H$ appelée hauteur de déplacement.

2.3.1. Stabilité et instabilité

Ce sont les gradients thermiques dans l'atmosphère qui déterminent le régime de stabilité.

Le jour, le sol est plus chaud que l'air : l'air froid étant plus dense que l'air chaud, le mouvement dû aux forces d'Archimède vont intensifier les échanges turbulents provoquant une situation instable. [40]

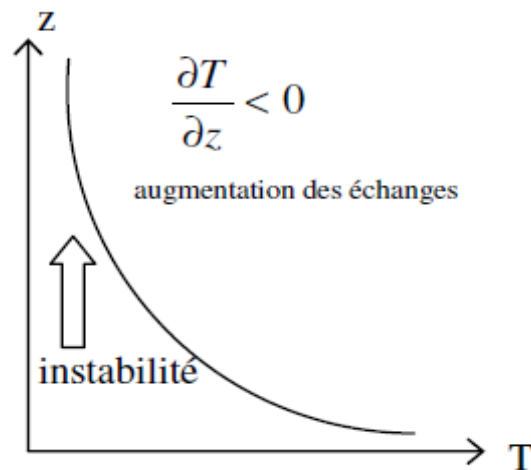


Figure 2.2 : Gradient thermique pendant la Journée [40]

La nuit, la situation est inversée avec un sol se refroidissant plus vite que l'air. Les forces d'Archimède agissent contre le mouvement turbulent engendrant une situation stable.

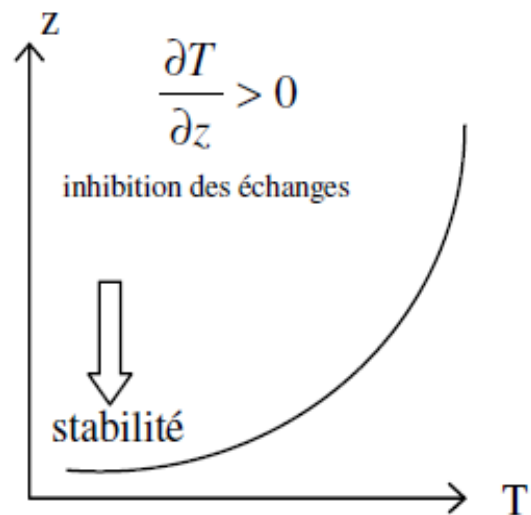


Figure 2.3 : Gradient thermique pendant la nuit [40]

Une situation neutre se présente le jour par temps couvert. A cause des nuages, le gradient thermique dans l'air est presque nul : les mouvements verticaux sont uniquement dus à la turbulence dynamique. C'est la longueur de Monin-Obukhov LMO qui détermine dans quel régime de stabilité on se trouve ($LMO < 0$: instable, $LMO > 0$: stable, $LMO = \infty$: neutre)

Pour u , la formulation suivante dans la CLS est généralement utilisée :

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \left(\ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) - \Psi_m \left(\frac{z-d}{L} \right) + \Psi_m \left(\frac{z_0}{L} \right) \right) \quad 2.14$$

Où z est la hauteur, u_* la vitesse de frottement, k la constante de Von-Karman ($= 0,41$), z_0 la rugosité, d La hauteur de déplacement, L_{MO} la longueur de Monin-Obukhov et Ψ_m une fonction de correction [41]

2.3.2. La longueur de Monin-Obukhov [41]

Ce qui a été fait jusqu'ici est valable dans le cas neutre ou proche de la neutralité où on néglige les effets du flux de chaleur (ou de flottaison) qui est donné par :

$$b = g \theta' / \theta_0 \quad 2.15$$

On définit la longueur de Monin-Obukhov

$$L = -\frac{u^{*3}}{k(\overline{w'\theta'})_s} = -\frac{u^{*3}\theta_0}{k g (\overline{w'\theta'})_s} \quad 2.16$$

Où l'indice S indique le flux mesuré juste au-dessus de la sous-couche de rugosité.

$$Q_0 = (\overline{w'\theta'})_s \quad 2.17$$

Où :

L est négative dans les conditions instables $Q_0 > 0$

L est positive dans les conditions stables $Q_0 < 0$

L est infini dans les conditions neutres $Q_0 = 0$

|L| est grand (plusieurs centaines de m) en conditions venteuses et peu ensoleillées

En conditions peu venteuses et ensoleillées, L est de l'ordre de -10m. En conditions nocturnes et calmes, L est positif de l'ordre de quelques dizaines à une centaine de m.

Les conditions sont neutres ou quasi-neutres pour $z \ll |L|$, c'est à dire près de la surface.

Quand $z \gg |L|$, ce qui peut se produire si L est assez petit en valeur absolue, en air calme, alors le flux de moment u^* est négligeable et tout est déterminé par le flux de chaleur .

Si de plus $L < 0$, on est dans la condition de convection libre [41]

2.4. Extrapolation verticale des paramètres du vent

Pour connaître tous les paramètres du vent, deux méthodes d'extrapolation de ces paramètres sont présentées ci-dessus, on site à court terme et à long terme.

2.4.1. Extrapolation à court terme

C'est le premier cas d'extrapolation de la vitesse du vent qui permet de connaître la vitesse du vent dans un endroit à partir d'un autre point de mesure. Les mesures sont prélevées d'une façon quasi instantanée, moyennée sur une minute ou une heure.

Dans ce qui suit on donne les lois d'extrapolation à court terme :

2.4.1.1. Justus C.G. et Mikhaïl (Loi logarithmique), [42]

Les premiers travaux portant sur la détermination des formules d'extrapolation de la vitesse du vent d'un niveau z_1 à z_2 ont été effectués par Justus C.G. et A.S. Mikhaïl qui étudient la variation de la vitesse du vent que l'extrapolation des paramètres de weibull en 1976. [11].

L'extrapolation de la vitesse mesurée V_1 en un point z_1 vers un niveau z_2 pour des conditions neutres de stabilité en fonction de la rugosité z_0 , s'écrit:

$$V_2 = V_1 \frac{\ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_2}{z_0}\right)} \quad 2.18$$

2.4.1.2. Loi de puissance 1/7 [42]

Les informations requises pour les deux lois précédentes n'étant pas toujours accessibles, Justus et Mikhaïl [8] ont préféré assimiler l'augmentation de la vitesse du vent avec la hauteur, dans la couche de surface, à une loi de puissance :

La loi de puissance se met sous la forme :

$$V_2 = V_1 \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^\alpha \quad 2.19$$

$$\alpha = \frac{\varphi_M\left(\frac{z_g}{L}\right)}{\ln\left(\frac{z_g}{z_0}\right) - \psi_m\left(\frac{z_g}{L}\right)} \quad 2.20$$

Afin d'éliminer l'effet de l'instabilité atmosphérique liée à la variation de la radiation solaire entre la nuit et le jour, l'auteur, [8] propose pour l'atmosphère stable, l'exposant suivant :

$$\alpha = \frac{1}{\ln\left(\frac{z_g}{z_0}\right)} \quad 2.21$$

z_g Étant la moyenne géométrique de la hauteur donnée par :

$$z_g = (z_1 * z_2)^{1/2} \quad 2.22$$

Pour des régimes de vent très élevés et pour des altitudes élevées, la loi de puissance 1/7 est la limite du modèle de similitude d'où l'expression, [10] :

$$V_2 = V_1 \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^{1/7} \quad 2.23$$

2.4.1.3. Loi de puissance [42]

La dépendance du paramètre de Monin-Obukov de la rugosité du sol a été étudiée par Justus C.G. et all, [7] sous la forme suivante :

$$V_2 = V_1 \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^n \quad 2.24$$

L'exposant de la loi de puissance permettant l'extrapolation de la vitesse instantanée du vent est donnée par :

$$n = a + b \ln V_1 \quad 2.25$$

Où V_1 est la vitesse mesurée.

Dans la gamme de rugosité suivante $0.05 \text{ m} \leq z_0 \leq 0.5 \text{ m}$, ils obtiennent alors :

$$a = \frac{0.37}{\left(1 - 0.088 \ln\left(\frac{z_1}{10}\right)\right)} \quad 2.26$$

$$b = \frac{-0.0881}{\left(1 - 0.0881 \ln\left(\frac{z_1}{10}\right)\right)} \quad 2.27$$

2.4.1.4. Loi de puissance modifiée

Ce modèle a pour but d'allier théorie et expérimentation par l'introduction du paramètre de rugosité dans la loi de puissance.

Pour une altitude égale à 10m, et pour des conditions neutres de stabilité, l'exposant de la loi de puissance se met sous la forme :

$$n_m = \frac{1}{\ln\left(\frac{z_g}{z_0}\right)} - \left[\frac{0.0881}{1 - 0.0881 \ln\left(\frac{z_1}{10}\right)} \right] \ln\left(\frac{V_1}{V_n}\right) \quad 2.28$$

Avec $V_n = 6$ m/s et z_g la moyenne géométrique de la hauteur.

En 1985, Mikhaïl ajuste expérimentalement le modèle précédent et propose l'expression suivante, [13]:

$$n = \frac{1}{\ln\left(\frac{z_g}{z_0}\right)} + \frac{0.0881 - 0.088 \ln V_1}{1 - 0.0881 \ln\left(\frac{z_1}{10}\right)} \quad 2.29$$

2.4.1.5. Loi à coefficient variable

H. Nfaoui et al [10] optent pour l'utilisation d'une formule empirique dont l'exposant est à coefficient variable, fonction de la rugosité. Cette expression a été proposée lors de l'établissement de l'atlas marocain, [11], soit :

$$n = \frac{x - 0.0881 \ln(V_1)}{1 - 0.0881 \ln\left(\frac{z_1}{10}\right)} \quad 2.30$$

En prenant pour :

$z_0 = 0$	-	0.005 m	$x=0.25$
$z_0 = 0.005$	-	0.05 m	$x=0.31$
$z_0 = 0.05$	-	0.5 m	$x=0.37$
$z_0 = 0.5$	-	4 m	$x=0.48$

On remarque que le coefficient varie en fonction de la classe de rugosité.

2.4.2. Extrapolation à long terme :

L'extrapolation verticale des paramètres du vent est liée aux résultats de l'étude statistique en occurrence par l'extrapolation des paramètres de Weibull.

Ainsi, à partir valeurs de C_1 et k_1 calculées à hauteur z_1 , les valeurs C_2 et k_2 à une autre hauteur z_2 peuvent être estimées en utilisant les modèles présentés ci-dessous.

2.4.2.1. Modèle d'extrapolation de Justus et Mikhaïl, [7]

En 1976, Justus et Mikhaïl ont proposé, pour une référence d'altitude initiale égale à 10m, les formules d'extrapolation suivantes :

$$\frac{k_2}{k_1} = \left[\frac{1 - 0.0881 \ln\left(\frac{z_1}{10}\right)}{1 - 0.0881 \ln\left(\frac{z_2}{10}\right)} \right] \quad 2.31$$

$$\frac{C_2}{C_1} = \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^m \quad 2.32$$

Avec

$$m = \left[\frac{0.37 - 0.0881 * \ln(C_1)}{1 - 0.0881 * \ln\left(\frac{z_1}{10}\right)} \right] \quad 2.33$$

2.4.2.2. Modèle modifié d'extrapolation de Justus, [7]

Justus a modifié en 1978, l'expression d'extrapolation des paramètres de Weibull en introduisant la rugosité du sol, tel que :

$$\frac{k_2}{k_1} = \left[\frac{1}{1 - 0.0881 * \ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)} \right] \quad 2.34$$

Et

$$\frac{c_2}{c_1} = \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^{m_1} \quad 2.35$$

Avec :

$$m_1 = \frac{1}{\ln\left(\frac{z_g}{z_0}\right)} - 0.00881 * \ln\left(\frac{c_1}{6}\right) \quad 2.36$$

2.4.2.3. Modèle modifié d'extrapolation de Mikhaïl, [13]

Pour une extrapolation à partir d'un niveau quelconque, Mikhaïl en 1985, reprend les expressions d'extrapolation des paramètres proposés en 1976, en modifiant l'exposant tel que :

$$m = \frac{1}{\ln\left(\frac{z_g}{z_0}\right)} + \frac{0.0881(1 - \ln C_1)}{1 - 0.0881 * \ln\left(\frac{z_1}{10}\right)} \quad 2.37$$

2.4.2.4. Modèle d'extrapolation de Spéra et all, [13]

Mikhaïl A.S., en 1985, [13], propose une extrapolation du paramètre de forme qui se présente sous la forme :

$$k_2 = k_1 \frac{1 - \alpha_0 \frac{\ln\left(\frac{z_1}{z_r}\right)}{\ln V_h}}{1 - \alpha_0 \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_r}\right)}{\ln V_h}} \quad 2.38$$

Avec :

$$\alpha_0 = \left(\frac{z_0}{z_r}\right)^{0.2} \quad 2.39$$

Zr étant la hauteur de référence égale à 10m et V_h la vitesse du vent homogène égal à V1. Par ailleurs, l'exposant mc de l'extrapolation du facteur d'échelle est donné par :

$$m_c = \alpha_0 \frac{1 - \frac{\ln(C_1)}{\ln V_h}}{\alpha_0 \ln\left(\frac{z_1}{z_r}\right) - \frac{1}{\ln V_h}} \quad 2.40$$

2.5. Energie électrique produit par un aérogénérateur [43]

2.5.1. Principe de fonctionnement de l'aérogénérateur :

Un aérogénérateur permet de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Pour convertir l'énergie cinétique en énergie électrique le générateur va utiliser le phénomène d'induction. En effet ce dernier est composé de deux parties, une partie mobile le rotor et une partie fixe, le stator, permettant de créer un champ magnétique et de générer un courant électrique. L'éolienne est également équipée d'une girouette permettant l'orientation des pales en fonction de la direction du vent. Elle doit être également fixée solidement au sol [48].

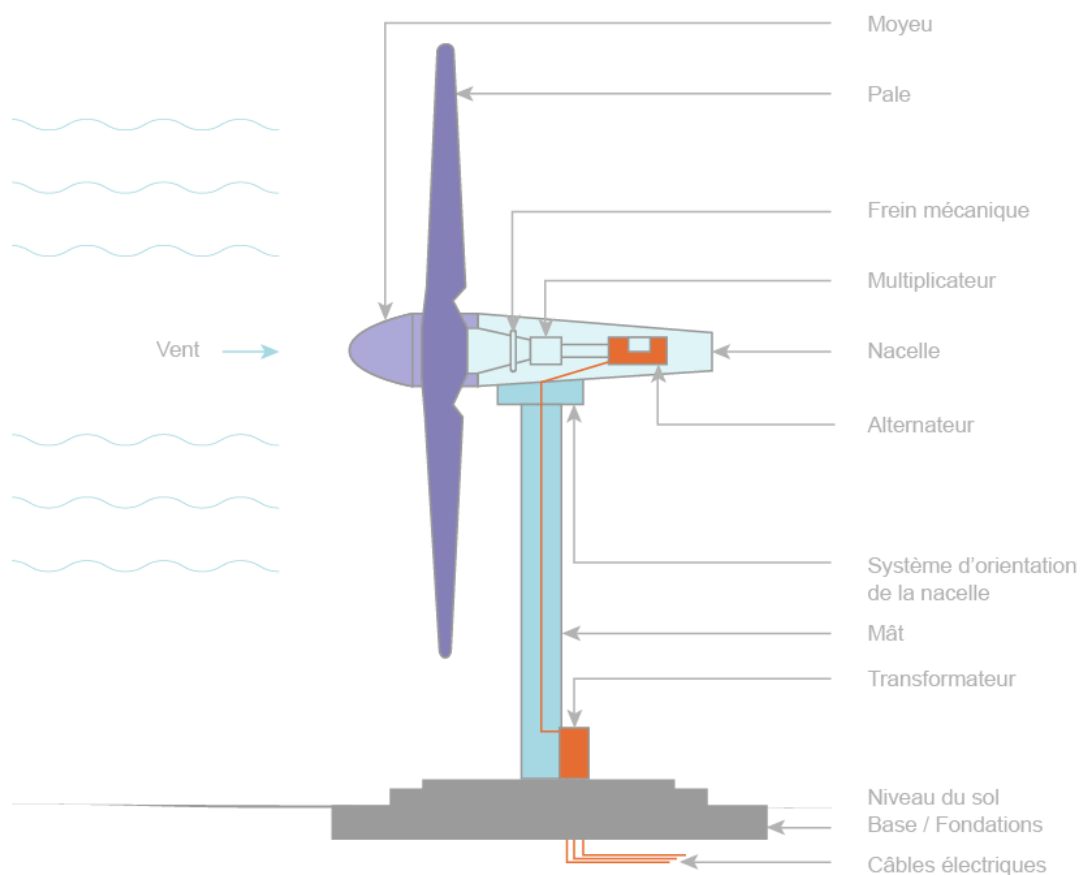


Figure 2.4. : Schéma d'un aérogénérateur [48]

2.5.2. Les facteurs selon le calcul de puissance [43]

2.5.2.1. Formule de Betz

L'énergie récupérable est inférieure à l'énergie cinétique de l'air situé en amont de l'éolienne, puisque l'air doit conserver une énergie cinétique résiduelle pour qu'il subsiste un écoulement. Albert Betz a démontré que la puissance maximale récupérable est égale aux 16/27 de la puissance incidente.[3]

La puissance maximale théorique d'une éolienne est ainsi fixée à :

$$P_{max} = \frac{16}{27} * \frac{1}{2} * \rho * S * V^3 \quad 2.41$$

Soit :

$$P_{max} = \frac{8}{27} * \rho * S * V^3 \quad 2.42$$

Formule dans laquelle :

P = puissance exprimé en watts (W) ;

S = surface balayée par les pales exprimée en mètres carrés (m²) ;

V = vitesse du vent en mètres par seconde (m/s)

Cette puissance maximale est ensuite affectée du coefficient de performance propre au type et au modèle d'éolienne et au site d'installation. Ce coefficient est en général compris entre 0,20 et 0,70.[3]

En remplaçant la densité de l'air par sa valeur moyenne, la moyenne maximale récupérable est donnée par [3] :

$$\langle P_r \rangle = 0.37 * S * \langle V^3 \rangle \quad 2.43$$

Ensuit l'énergie moyenne récupérable sur une année, $\langle E \rangle$ est égale à, [3] :

$$\langle E \rangle = \langle P_r \rangle \Delta t = 0.37 * 24 * 365.25 * S * \langle V^3 \rangle \quad 2.44$$

Soit en kWh :

$$\langle E \rangle = 3.25 * S * \langle V^3 \rangle \quad 2.45$$

Sachant que l'énergie électrique délivrer par un aérogénérateur est à l'environnement de 25% de rendement globale de la puissance énergétique disponible dans un site.

2.5.3. 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 [44] :

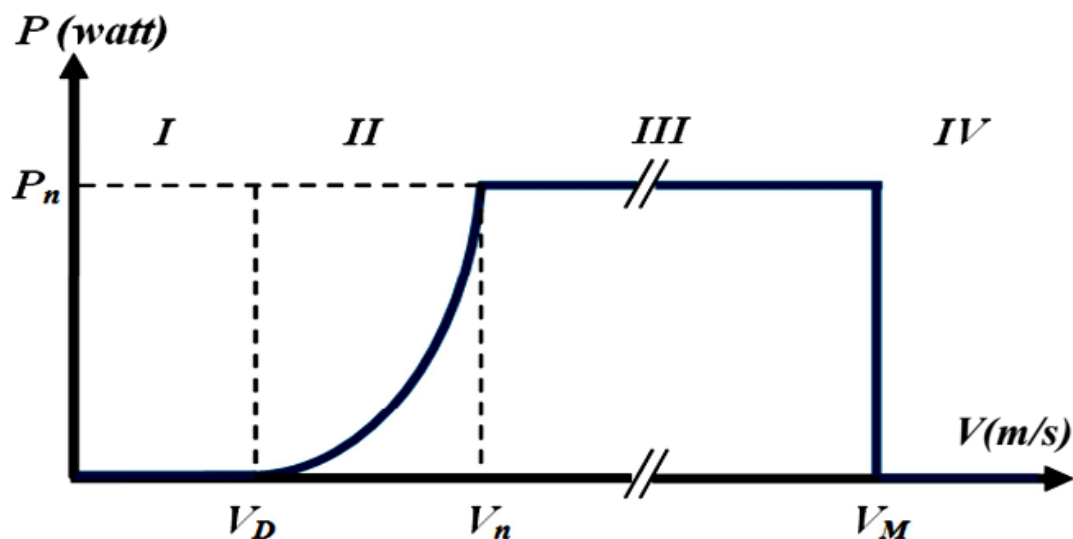


Figure 2.5 : Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent. [44]

V_D : La vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine selon les constructeurs, elle 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.

V_M : vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales. Pour la grande majorité des éoliennes, V_M vaut 25m/s [48].

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.

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 [45].

2.6. Conclusion

L'énergie éolienne moyenne disponible sur un site donné par unité de temps et par unité de surface de la roue d'une éolienne s'écrit en fonction de la masse volumique de l'air et la vitesse cubique moyenne du vent, la détermination de cette dernière se fait à partir d'étude statistique en utilisant la distribution de Weibull. La méthode de vraisemblance présentée permet de déterminer les facteurs k et c . A des altitudes élevées l'influence de la surface de la terre sur l'écoulement du vent est pratiquement nulle cependant, a des couches d'air plus basses la friction contre la surface influe beaucoup sur la vitesse du vent. On note également la rugosité du terrain et l'influence des obstacles avoisinants et le contour du paysage, en générale une forte rugosité diminue considérablement la vitesse du vent près du sol. Le régime de stabilité est déterminé par les gradients thermiques et c'est la longueur de Monin Obukov qui détermine dans quel régime de stabilité on se trouve (stables, instable, neutre) et cela en étant positive, négative, ou infini. L'extrapolation verticale des paramètres du vent montre que l'extrapolation à court terme on démontre graphiquement que pour des régimes de vents très élevés et pour des altitudes élevées, la loi de puissance $1/7$ est la limite du modèle de similitude, l'exposant de la loi de puissance permettant l'extrapolation de la vitesse instantanée du vent. Pour l'extrapolation à long terme on retrouve quatre modèles d'extrapolation. Un aérogénérateur va, par phénomène d'induction, transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique on note que quatre zones de fonctionnement sont possibles pour l'éolienne suivant la vitesse du vent, sachant que l'énergie récupérable est inférieure à l'énergie cinétique de l'air en amont de l'éolienne, selon Albert Bertz la puissance maximale récupérable est égale aux $16/27$ de la puissance incidente cette puissance est ensuite affectée du coefficient de performance propre au type et au modèle d'éolienne et au site d'installation



Chapitre 3
Méthodologie et Simulation



3.1. Introduction

Le présent chapitre porte sur la présentation en premier lieu des modèles utilisées pour la comparaison, et le choix de modèle adéquat pour l'extrapolation verticale de la vitesse du vent. Le programme développé pour la comparaison des différents modèles est aussi présenté ainsi que le traitement des données et le lieu d'implantation du mat où elles sont prélevées.

3.2. Présentation du site de mesure

En général, les données éoliennes disponibles dans tous les pays sont recueillies près des agglomérations, des aéroports ou autres. Ces données fournies par les aéroports, les bases militaires et les stations météorologiques ne sont généralement pas représentatives des vents qui soufflent en des lieux particulièrement exposés et où l'installation de fermes éoliennes s'avère adéquat. En effet, le potentiel éolien est souvent sous-estimé. Il est donc nécessaire d'implanter des mâts dans des sites adéquats pour mesurer les paramètres du vent. C'est le cas du site de ksar El Chellala qui se trouve sur un terrain normalisé loin de toute agglomération ou autre perturbations.

Ksar El Chellala est une commune algérienne de la wilaya de Tiaret. Elle est située à 116 km à l'Est de Tiaret et à 260 km au Sud d'Alger dans les Hauts-plateaux. Elle est classée parmi la catégorie de site semi-aride. Au figure 3.1 sont données les caractéristiques du site. [46]




Ksar Chellala			
Noms		Localisation	
Nom arabe	قصر الشلالة		
Pays	 Algérie		
Wilaya	Tiaret		
Daïra	ksar chellala		
Démographie			
Population	52 753 hab. (2008 ¹)		
Géographie			
Coordonnées	 35° 13' 00" Nord 2°19'00" Est 35.216667, 2.316667	Altitude	800 m

Figure 3.1 : Carte identité de site [46]

En figure 3.2 est donnée la topographie de la wilaya de Tiaret où est situé le site de Ksar El Chellala.

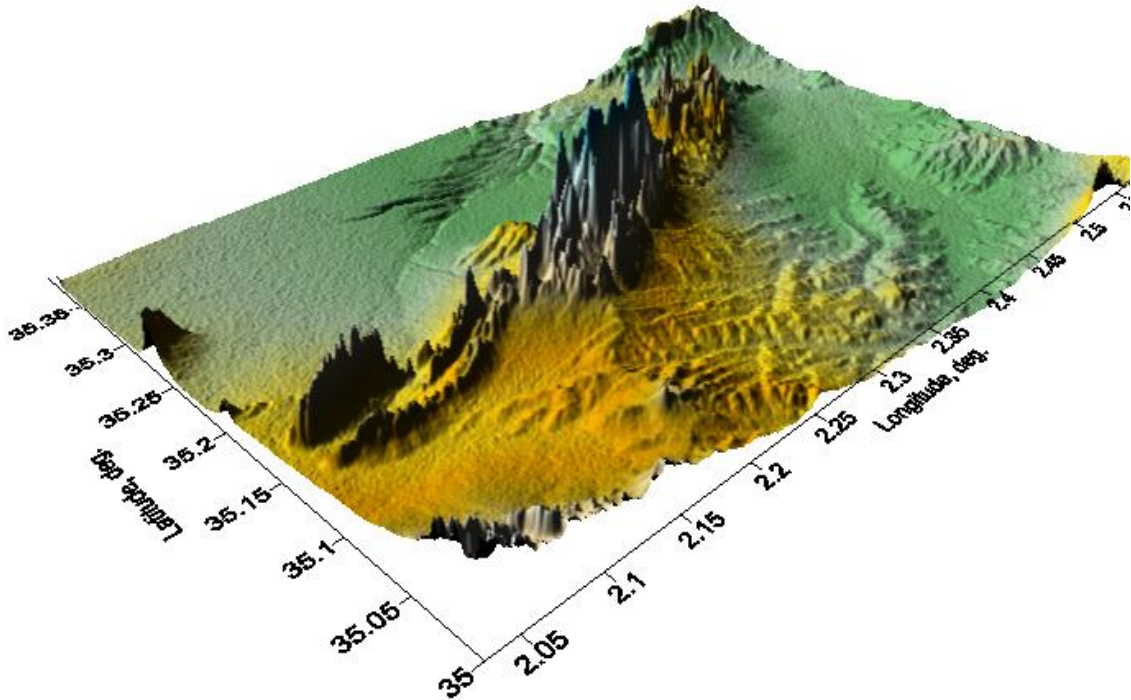


Figure 3.2: Topographie du site [47]

3.3. Mat de mesures et mesures collectées

Les données météorologiques considérées lors de l'étude, sont prélevées sur le pylône implanté par l'office Nationale de la Météorologie (ONM) à la station météorologique de Ksar El Chellala, (Figure 3.3). Le mât est équipé de plusieurs niveaux de mesure allant de 2, 10, 20, 30, 40, et 50 m. Chaque niveau est équipé de station automatique de mesures météorologiques et radiométriques, à savoir la température, l'éclairement solaire global, la vitesse et la direction du vent, mesurés toutes les 10 mn. L'avantage de ce site est qu'il diffère de la règle classique de l'ONM qui consistait à placer les capteurs à 10 m au-dessus du sol. Il répond aux normes de l'OMM car le mât de mesure est installé sur un terrain dégagé, qui respecte les critères suivants [48] :

- ✓ Le pylône est installé à une distance au moins égale à dix fois la hauteur des obstacles environnants.
- ✓ Les obstacles ne dépassent pas la hauteur de 5.5 m dans un rayon de 100 m autour du pylône.
- ✓ Les effets des obstacles de hauteur inférieure à 2 m sont négligés.
- ✓ Tout changement de relief dans un rayon de 100 m est aussi considéré comme un obstacle.
- ✓ Les capteurs de mesures sont situés à une distance minimale de quinze fois la largeur d'un obstacle mince (mât, arbre mince) qui dépassent une hauteur de 8 m. en figure 3.3 est présenté le mât de mesure [49].

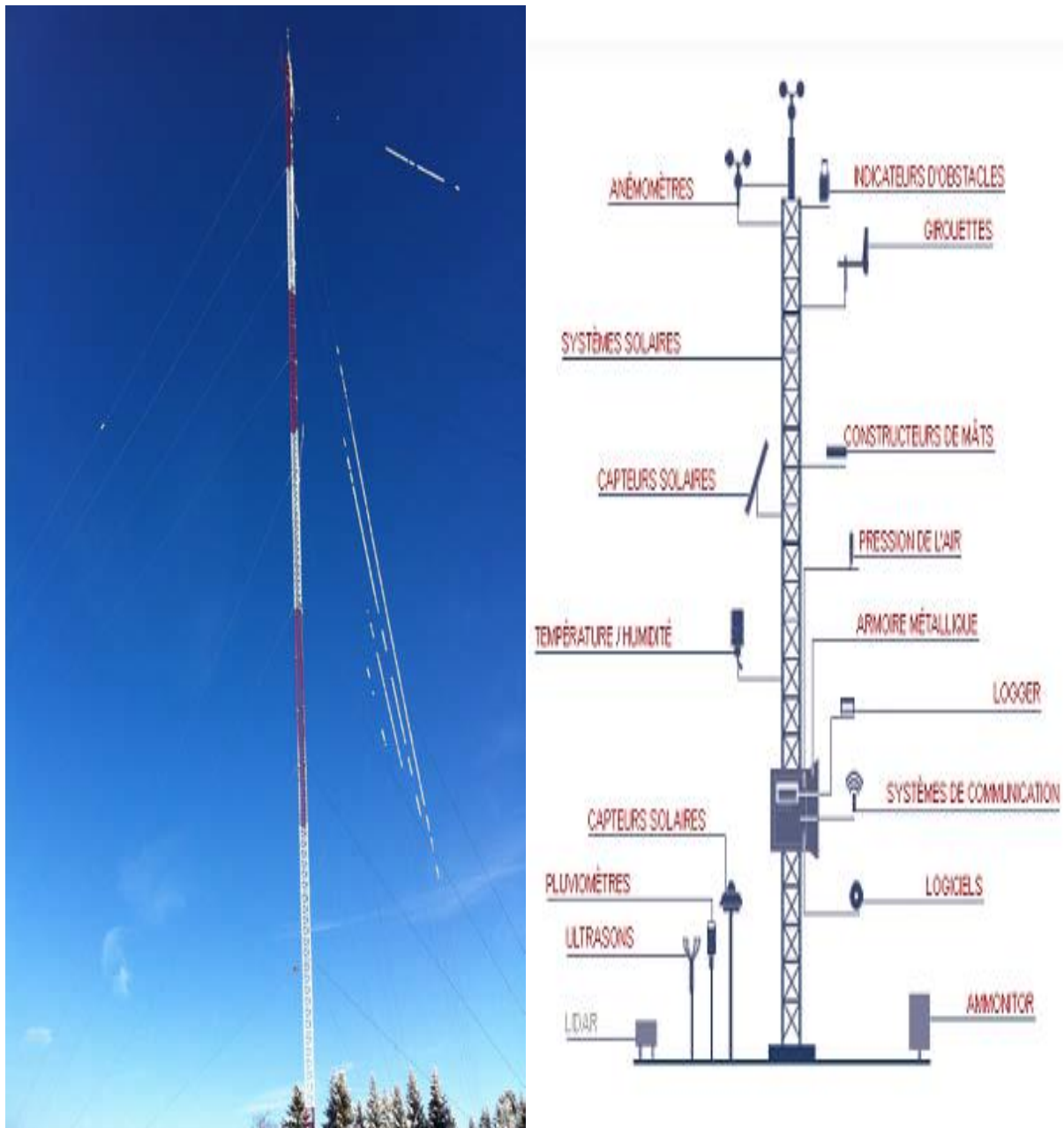


Figure 3.3: Station de mesure du vent [48]

Pour l'étude, nous utilisons les données prélevées par les anémomètres aux hauteurs 2, 10, 20, 30, 40 m.

3.4. Modelés utilisés

Pour l'étude, nous distinguons les modèles à court terme et à long terme

3.4.1. Modèle à Court terme

Les modèles à court terme portent sur l'extrapolation des vecteurs de vitesse du vent mesurés aux hauteurs initiales (2 m, 10 m, 20 m, 30 m) vers la hauteur de 40 m. une fois les vitesses obtenues on procède à l'estimation la détermination des paramètres de weibull qui seront comparés avec ceux estimés à la hauteur 40 m.

Les modèles utilisés sont donnée au tableau 3.1

Tableau 3.1 : Modèles choisis pour l'étude à court terme

Modèle	Formules utilisés
Loi logarithmique [9]	$V_2 = V_1 \frac{\ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_2}{z_0}\right)}$ 3.1
Loi de puissance 1/7 [9]	$V_2 = V_1 \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^{1/7}$ 3.2
Loi de puissance [7]	$V_2 = V_1 \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^n$ avec $n = a + b \ln V_1$ Et $a = \frac{0.37}{(1-0.088 \ln(\frac{z_1}{10}))}$ $b = \frac{-0.0881}{(1-0.0881 \ln(\frac{z_1}{10}))}$ 3.3
Loi de puissance modifiée [12]	$V_2 = V_1 \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^n$ 3.4 Avec : $n = \frac{1}{\ln\left(\frac{z_g}{z_0}\right)} + \frac{0.0881 - 0.088 \ln V_1}{1 - 0.0881 \ln \frac{z_1}{10}}$
Loi de puissance à coefficient variable [10]	$V_2 = V_1 \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^n$ 3.5 Avec : $n = \frac{x - 0.0881 \ln(V_1)}{1 - 0.0881 \ln\left(\frac{z_1}{10}\right)}$ En prenant pour : z0 = 0 - 0.005 m x=0.25 z0 = 0.005 - 0.05 m x=0.31 z0 = 0.05 - 0.5 m x=0.37 z0 = 0.5 - 4 m x=0.48

3.4.2. Modèles à long terme

Les modèles utilisés pour l'extrapolation à long terme sont donnée au tableau 3.2

Tableau 3.2 : Modèles choisis pour l'étude à long terme

Modèle	Formules utilisés pour le facteur de forme k	Formules utilisés pour le facteur d'échelle c
Modèle d'extrapolation de Justus et Mikhaïel [7]	$\frac{k_2}{k_1} = \left[\frac{1-0.0881 \cdot \ln\left(\frac{z_1}{10}\right)}{1-0.0881 \cdot \ln\left(\frac{z_2}{10}\right)} \right]$	$\frac{c_2}{c_1} = \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^m$ avec : 3.6 $m = \left[\frac{0.37-0.0881 \cdot \ln(C_1)}{1-0.00881 \cdot \ln\left(\frac{z_1}{10}\right)} \right]$
Modèle modifié d'extrapolation de Justus [12]	$\frac{k_2}{k_1} = \left[\frac{1}{1-0.0881 \cdot \ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)} \right]$	$\frac{c_2}{c_1} = \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^{m_1}$ avec : 3.7 $m_1 = \frac{1}{\ln\left(\frac{z_g}{z_0}\right)} - 0.00881 \ln\left(\frac{C_1}{6}\right)$
Modèle modifié d'extrapolation de Mikhaïel [13]	$\frac{k_2}{k_1} = \left[\frac{1-0.0881 \cdot \ln\left(\frac{z_1}{10}\right)}{1-0.0881 \cdot \ln\left(\frac{z_2}{10}\right)} \right]$	$\frac{c_2}{c_1} = \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^m$ avec : 3.8 $m = \frac{1}{\ln\left(\frac{z_g}{z_0}\right)} + \frac{0.0881(1 - \ln C_1)}{1 - 0.0881 \cdot \ln\left(\frac{z_1}{10}\right)}$

Les modèles à long terme portent sur l'estimation des paramètres de weibull aux niveaux initiaux (2 m, 10 m, 20 m, 30 m), puis leurs extrapolations vers le niveau de 40 m.

3.4.3. Calcul d'erreur relatif

La comparaison des résultats s'effectue à travers le calcul de l'erreur relative. L'erreur relative représente le rapport de la différence entre la valeur mesurée et celle estimée. Il est donné par l'expression suivante, [3] :

$$\varepsilon = \frac{Val_{mesuré} - Val_{estimé}}{Val_{mesuré}} \quad 3.9$$

3.5. Simulation développée

3.5.1. Traitement des données de mesure

Les fichiers obtenus sont donnés en format txt sans aucune identification de la hauteur de mesure. Le logiciel développé sous MatLab permet la lecture des fichiers à partir une feuille d'enregistrement type (.txt). Une identification des colonnes de données suivant la hauteur de mesure est effectué pour procède au calcul soit des vitesses soit des paramètres de weibull.

3.5.2. Présentation du programme de calcul développé

Le schéma de structure du programme est donné en figure 3.4 ou est représenté l'organisation des calculs effectués.

Le programme porte sur plusieurs menus qui permettent le choix du cas d'extrapolation et le modèle à utiliser ce qui facilite le déplacement entre les modèles.

Le schéma 3.5 présente la structure du programme.

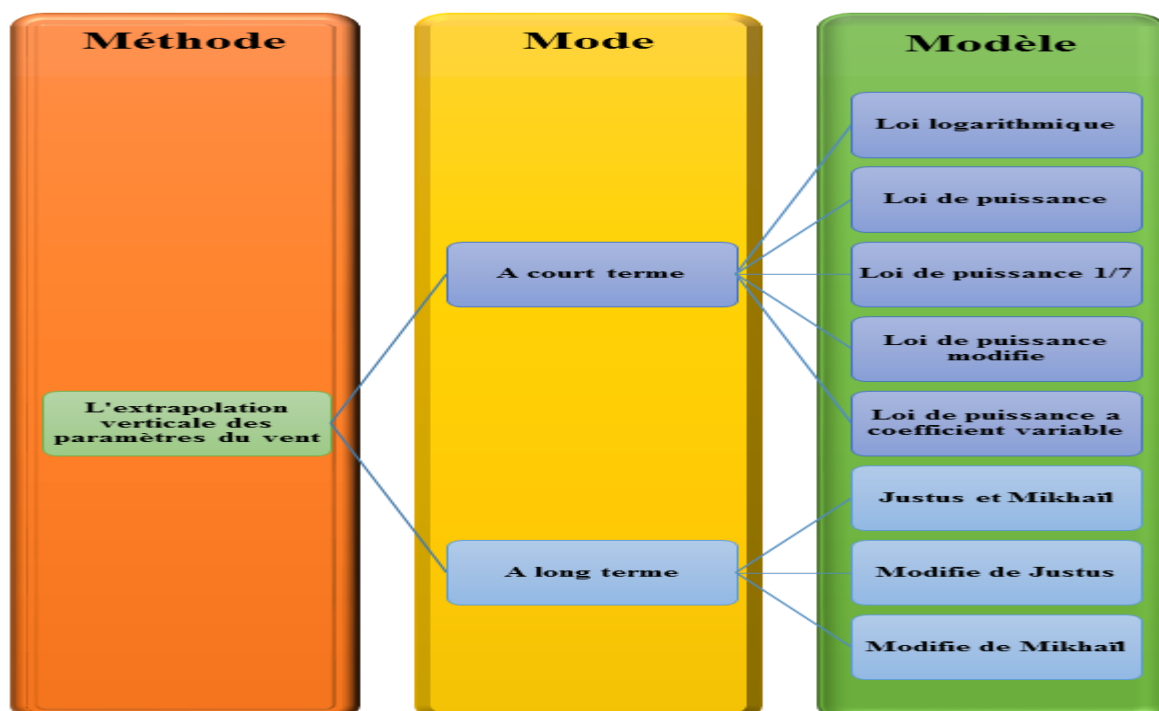


Figure 3.4 : Organigramme présenté les modèle choisie

3.5.3. Organigramme de calcul

L'environnement MatLab permet la programmation orienté objet par la création d'un permettant l'affichage d'un menu de choix. Une fois le choix porté, un menu permet le choix du modèle pour le calcul des paramètres de weibull à différents niveaux.

Ces valeurs calculées successivement sont utilisées pour le calcul des écarts relatifs par rapport à la hauteur de référence de 40 m. Les résultats obtenus sont représentés sous forme graphique par le tracé de la distribution au niveau traité. Les paramètres de weibull (C et k) sont estimés par la méthode de vraisemblances donnée au paragraphe chapitre 2. Le calcul de la vitesse moyenne et du potentiel éolien disponible se fait à travers un menu permettant l'affichage ou non des résultats de l'écart relatif des paramètres de weibull de chaque modèle. Par ailleurs l'extrapolation verticale des paramètres du vent à court et long terme se fait à travers un menu automatique qui permet le retour au début du menu selon le choix. En figure 3.5 est donné l'organigramme du programme développé.

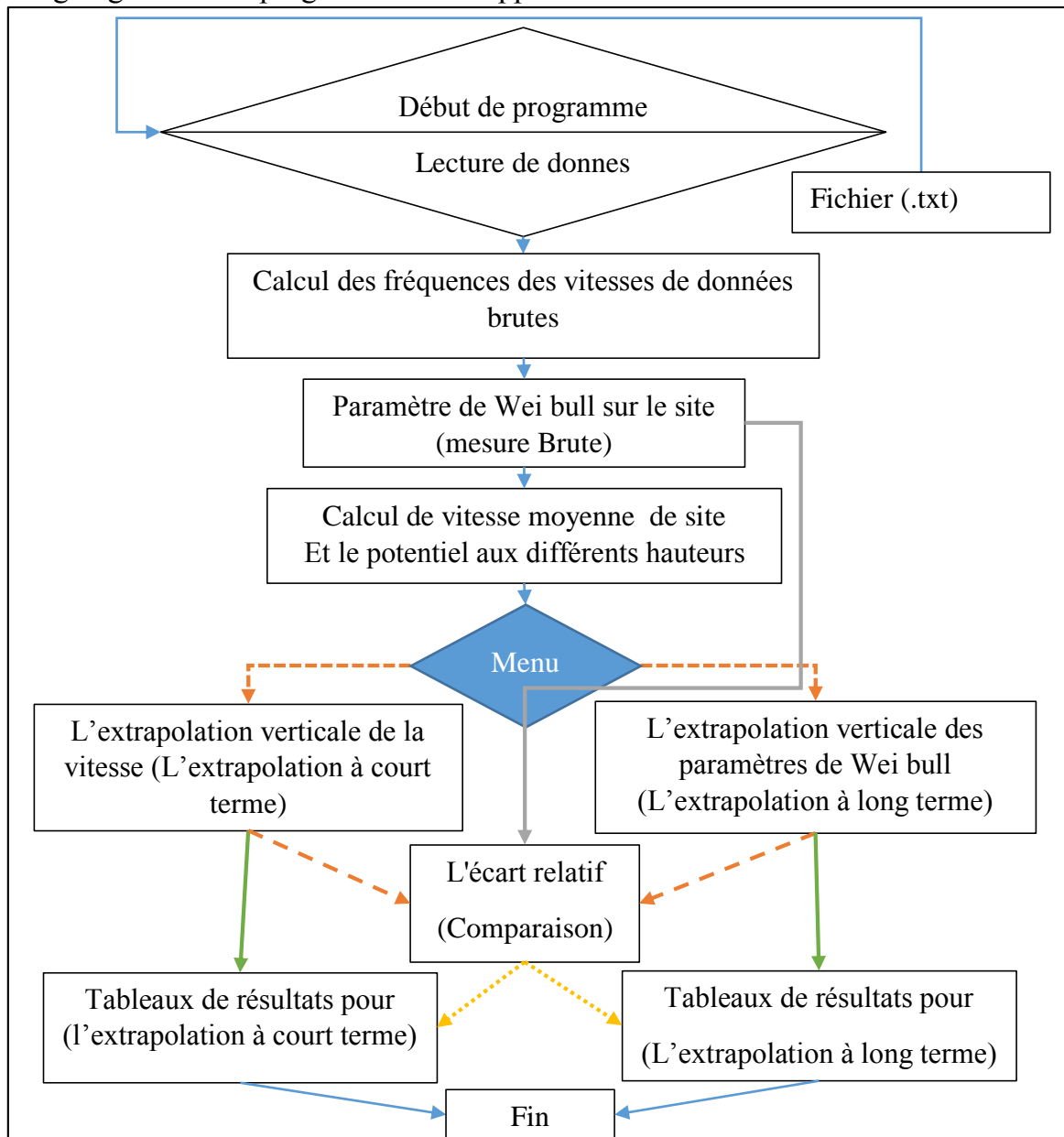


Figure 3.5 : Organigramme de programme développé sous MatLab

3.6. Application à un aérogénérateur de puissance

3.6.1. L'éolienne utilisée

Pour faire les calculs pour le calcul de l'énergie produit par une éolienne il faut connaitre ces caractéristiques. Les caractéristiques de l'éolienne choisie sont affichées dans le tableau 3.3 Ces caractéristiques varient suivant le choix d'éolienne. L'aérogénérateur la Vestas V80-2,0 MW a été choisi pour l'étude.

Se même puissances est donnée en figure 3.6

3.6.2. Les caractéristiques de l'éolienne

Tableau 3.3 : Fiche technique de la V80-2,0 MW [50]

Diamètre de rotor	80 m
Surface balayée	5027 m ²
Nombre des pales	3
Longueur de pale	42.5
La hauteur de moyeu	60 m
Vitesse de rotation	16,7 tr/min
Puissance maximale	2.0 MW
Vitesse de démarrage	4 m/s
Vitesse de coupure	25 m/s
Vitesse nominale	15 m/s
Type de multiplicateur	Planétaires/parallèles
Type de contrôle	Commande par microprocesseur de toutes les fonctions de l'éolienne avec possibilité de télésurveillance. Système OptiSpeed® pour la régulation et l'optimisation de la puissance et système OptiTip® pour la régulation du pas des pales.

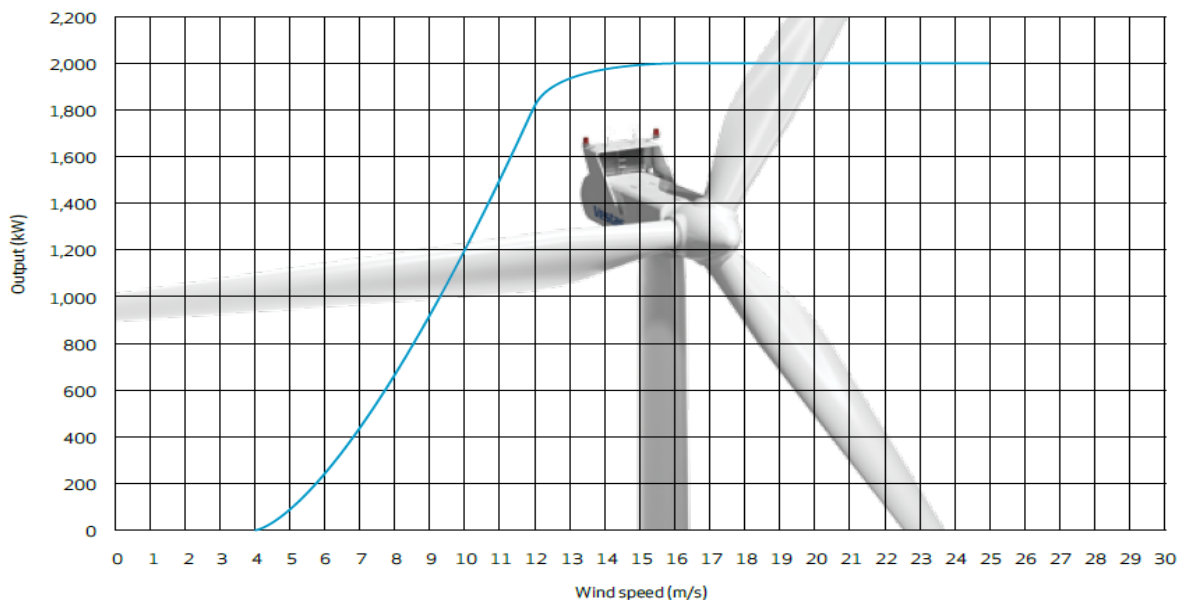


Figure 3.6 : La courbe de puissance d'éolienne V80-2,0 MW [50]

3.7. Conclusion

Les données éoliennes disponibles dans tous les pays sont recueillies près des agglomérations, et fournies par les aéroports, les bases militaires et les stations météorologiques. Elles ne sont généralement pas représentatives des vents qui soufflent en des lieux exposés, il est donc nécessaire d'implanter des mats dans des sites adéquats pour mesurer les paramètres du vent notamment du site Ksar El Chellala zone semi-aride qui se trouve à 260km au sud d'Alger. Les données météorologiques considérées lors de l'étude sont prélevées sur le pylône implanter par l'ONM a la station météorologique de Ksar El Chellala. Nous utilisons les données prélevées par les anémomètres aux hauteurs représentées et on distingue les modèles un court et long terme selon l'extrapolation et la hauteur estimer ,la comparaison des résultats s'effectue à travers le calcul relative. Les fichiers obtenus sont donnés en formant txt sans aucune identification de la hauteur de mesure, le logiciel développé sous MATLAB permet la lecture des fichiers, des résultats représentés sous forme graphique, les paramètres de Weibull (c et k) qui sont estimés par la méthode de vraisemblances. L'aérogénérateur Vestas V80-2.0 MW a été choisie pour l'étude. Pour l'estimation de la production électrique sur le site donné.



Chapitre 4
Résultats et discussions



4.1. Introduction

Le présent chapitre porte sur la production et la discussion des résultats obtenus par la simulation numérique établie pour déterminer la formule adéquate pour l'extrapolation verticale des paramètres du vent.

4.2. Etude et Traitement des données brutes de la vitesse du vent

4.2.1. Variation temporelle de la vitesse mesurée

En Figure 4.1 sont représentés les tracés de la variation temporelle des mesures brutes de la vitesse du vent aux différents niveaux, par les anémomètres installés.

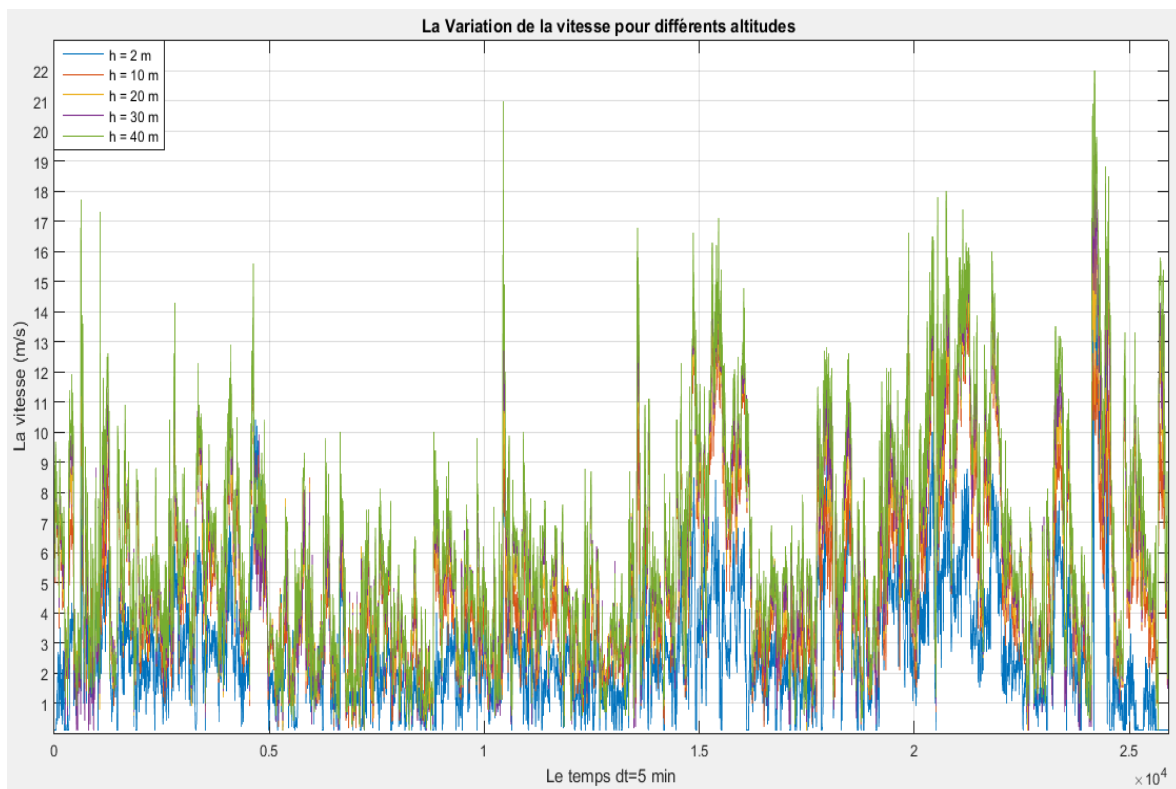


Figure 4.1 : La variation de vitesse à différent hauteur en fonction de temps

On remarque dans la Figure 4.1 que les variations entre chaque les courbes de vitesse est logique car elle est définie le phénomène de la variation de la vitesse du vent en fonction de la variation de la hauteur. Ces mesures permettent de voir la concordance des mesures. On note que les maximas atteints augmentent avec l'altitude. Tel que montré au tableau 4.1.

Tableau 4.1 : La variation des vitesses max à différent hauteur

Hauteur, m	V-MAX, m/s
2 m	16.5 m/s
10 m	16.1 m/s
20 m	19.1 m/s
30 m	20.40 m/s
40	22 /s

4.2.2. Fréquences et distribution de Weibull pour chaque hauteur

Le traitement statistique des données mesurées à chaque hauteur a permis le calcul des fréquences pour des pas de vitesse de 1m/s. Les fréquences des vitesses obtenues sont affichées dans le tableau 4.2

Tableau 4.2 : Fréquences de la vitesse (mesures brutes) à chaque hauteur

H = 2 m		H = 10 m		H = 20 m		H = 30 m		H = 40 m	
V	Freq	V	Freq	V	Freq	V	Freq	V	Freq
1	0.22	1	0.06	1	0.06	1	0.06	1	0.05
2	0.26	2	0.16	2	0.12	2	0.10	2	0.09
3	0.17	3	0.17	3	0.15	3	0.13	3	0.11
4	0.08	4	0.16	4	0.15	4	0.13	4	0.13
5	0.06	5	0.11	5	0.13	5	0.13	5	0.13
6	0.05	6	0.09	6	0.10	6	0.11	6	0.11
7	0.03	7	0.06	7	0.07	7	0.08	7	0.09
8	0.02	8	0.05	8	0.06	8	0.06	8	0.06
9	0.01	9	0.04	9	0.05	9	0.05	9	0.05
10	0.01	10	0.03	10	0.04	10	0.04	10	0.05
11	0.001	11	0.02	11	0.03	11	0.03	11	0.03
12	0.001	12	0.01	12	0.02	12	0.02	12	0.03
13	0.001	13	0.01	13	0.02	13	0.02	13	0.02
14	0.001	14	0.01	14	0.01	14	0.01	14	0.01
15	0.001	15	0.002	15	0.01	15	0.01	15	0.01
16	0.0004	16	0.0006	16	0.004	16	0.01	16	0.01
				17	0.0006	17	0.001	17	0.004
				18	0.0002	18	0.002	18	0.002
				19	0.0002	19	0.0004	19	0.0008
						20	0.0004	20	0.001
								21	0.0006
								22	0.0004

On remarque que les gammes de variation diffèrent d'une hauteur à une autre jusqu'à atteindre un maximum à la hauteur de 40 m.

En figure 4.2 est donnée, le tracé de la distribution de weibull pour chaque niveau. On remarque dans la figure 3.2 que les points des fréquences de la vitesse et le lissage des courbes distributions de weibull sont en bonne concordance. Ceci indique que la méthode de Maximum de vraisemblances est bien adaptée pour l'estimation des paramètres de Weibull.

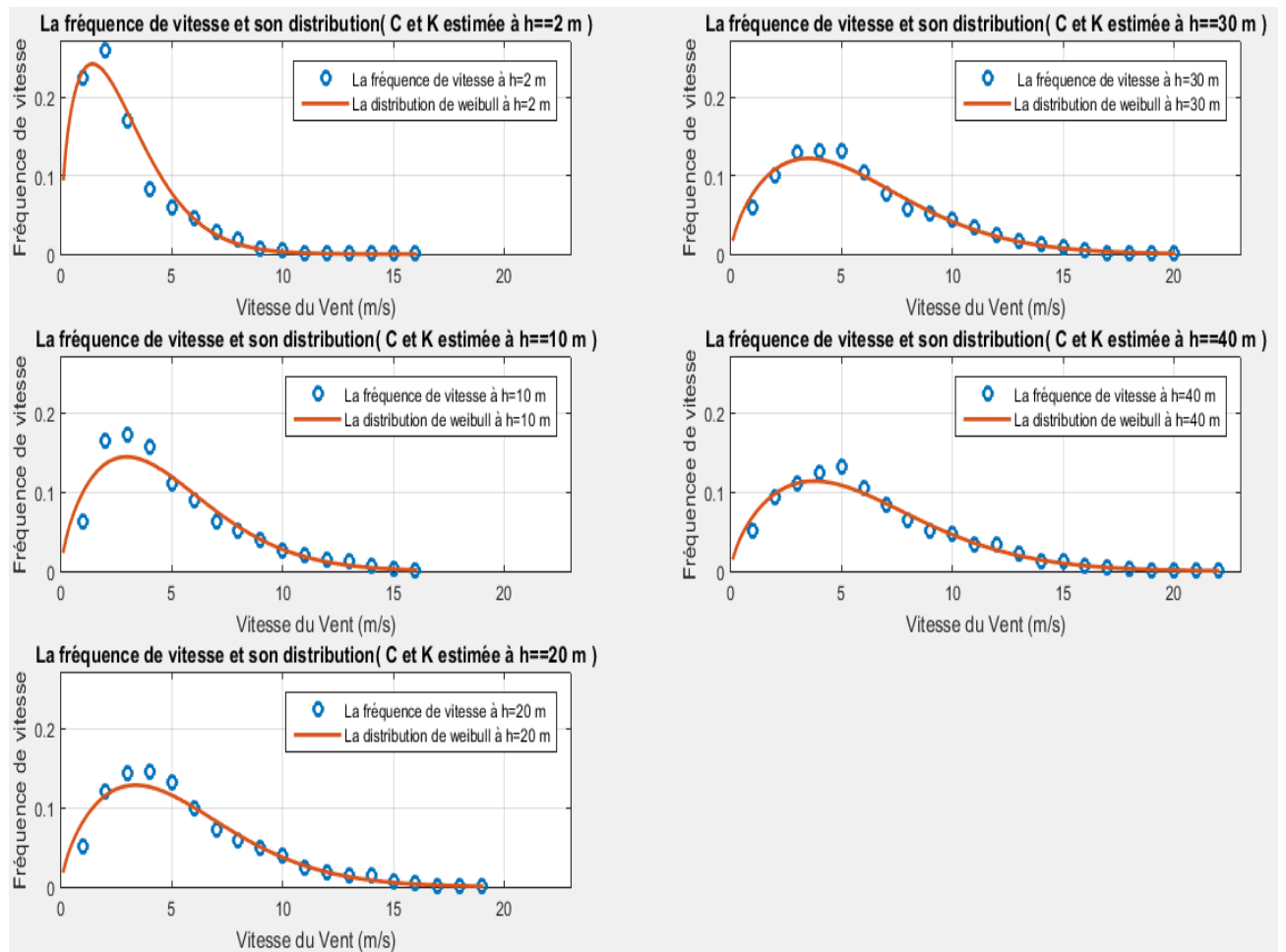


Figure 4.2 : Fréquences et Distribution de Wei bull à chaque hauteur

En figure 4.3, sont comparés les distributions de weibull pour les différentes hauteurs. On remarque aussi que pour de faibles hauteurs, la distribution de weibull se rapproche plus de la loi binomiale. En effet, pour h=2 m, les mesures sont concentrées autour de la moyenne puis les tracés sont plus étalés avec des modes plus grands lorsque l'altitude croit.

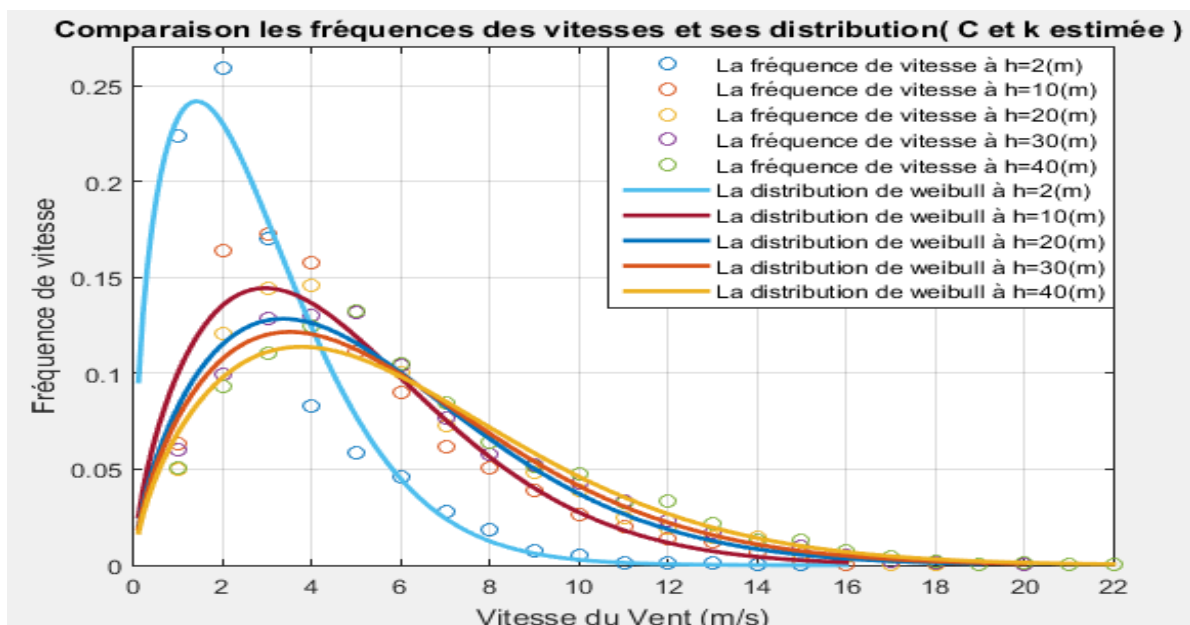


Figure 4.3 : Tracés des distributions et des fréquences

Au tableau 4.3 sont affichés les résultats estimés des paramètres de Weibull, les vitesses moyennes et les densités de puissances disponibles à différentes hauteurs 2 m, 10 m, 20 m, 30 m, et 40 m extraits directement depuis la fenêtre de commande de logiciel sous Matlab du programme développé.

Tableau 4.3 : Paramètres du site à partir la mesure brute.

h, (m)	2	10	20	30	40
C, (m/s)	3.06	5.29	5.97	6.29	6.73
K, (//)	1.46	1.62	1.63	1.62	1.63
Vmoy, (m/s)	2.77	4.74	5.34	5.63	6.02
P, (W/m ²)	35.85	155.57	220.82	260.60	317.55

Le tableau 4.3, indique que l'augmentation de la hauteur génère une augmentation des valeurs du facteur d'échelle de Weibull C qui entraîne simultanément une augmentation des vitesses moyennes et de la densité de puissance disponible du site.

Le tracé des vitesses moyennes est donné en figure 4.4 où on retrouve le profil logarithmique du profil de la vitesse du vent tel que cité dans la littérature.

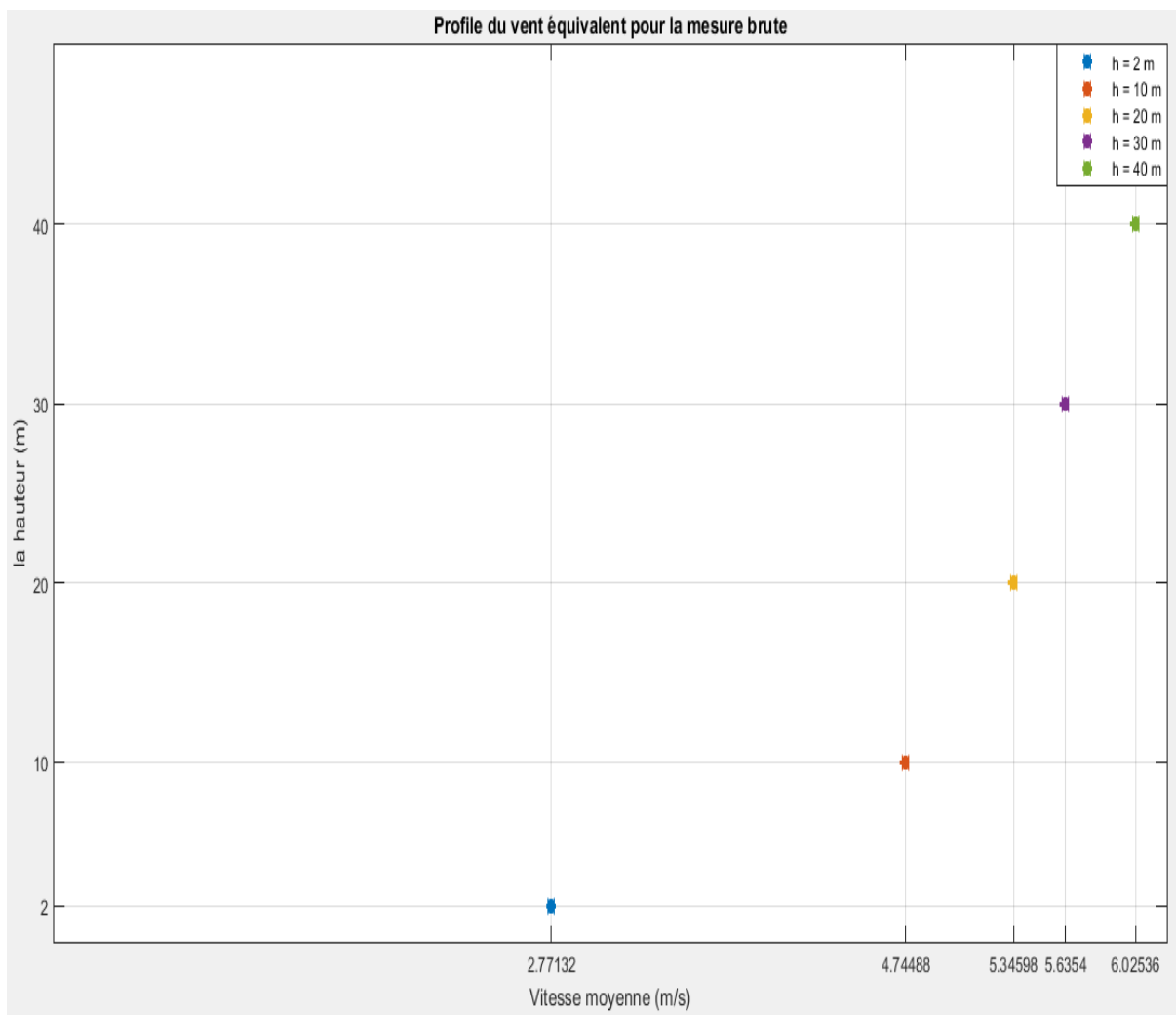


Figure 4.4 : Tracé de la vitesse moyenne en fonction de différentes hauteurs

En figure 4.5 sont tracés les densités de puissances disponibles aux différentes hauteurs du mats.

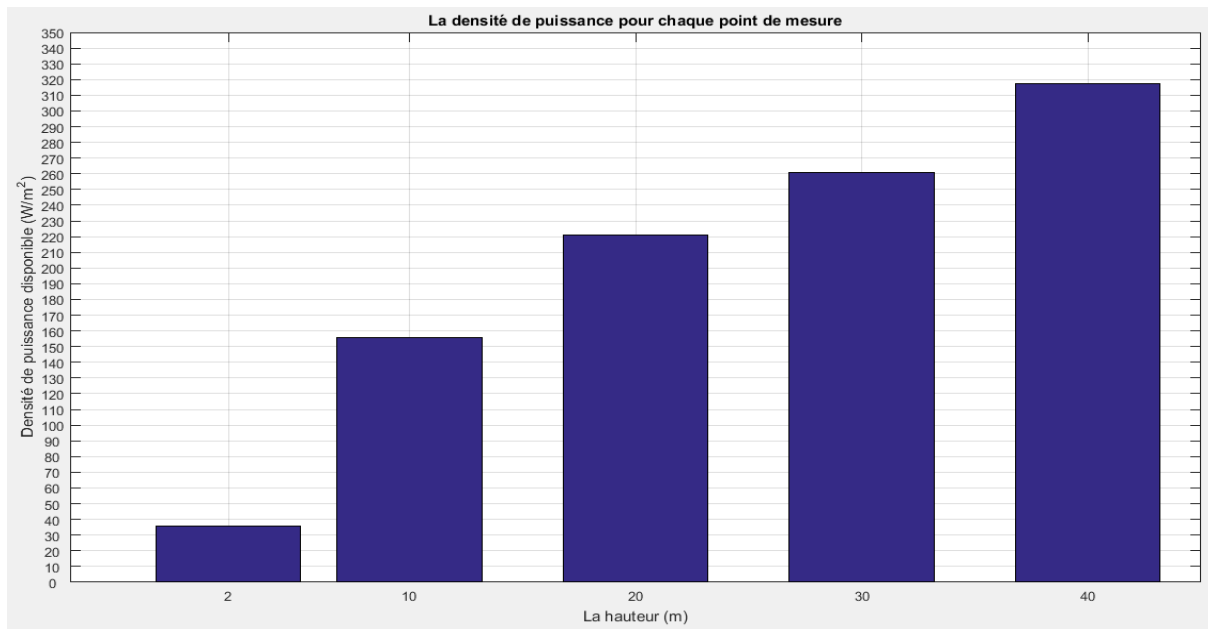


Figure 4.5 : L'organigramme de la densité de puissance disponible

On remarque que cette dernière augmente avec la hauteur et passe de 35.85 W/m^2 à 2m du sol jusqu'à atteindre la valeur 317.55 W/m^2 , soit presque 10 fois à 40 m du sol.

4.3. Extrapolation verticale des paramètres du vent

On distingue dans le chapitre suivant les deux cas:

- L'extrapolation à court terme
- L'extrapolation à long terme

Les vitesses des hauteurs 2, 10, 20, 30 m sont extrapolés vers la hauteur de 40 m et comparés à travers le calcul des erreurs relatives pour déterminer la formule la plus adéquate.

Le même scénario se répète pour l'extrapolation à long terme où les facteurs de Weibull sont extrapolés de 2, 10, 20, 30 m à 40 m.

4.3.1. Extrapolation à court terme

Il s'agit d'utiliser les formules empiriques à court terme à savoir

- La loi logarithmique.
- La loi de puissance $1/7$.
- La loi de puissance.
- La loi de puissance modifiée.
- La loi de puissance à coefficient variable.

a- Loi logarithmique

Figure 4.6 le tracé de distribution de Weibull et la fréquence en fonction de la vitesse selon la loi logarithmique (3.1).

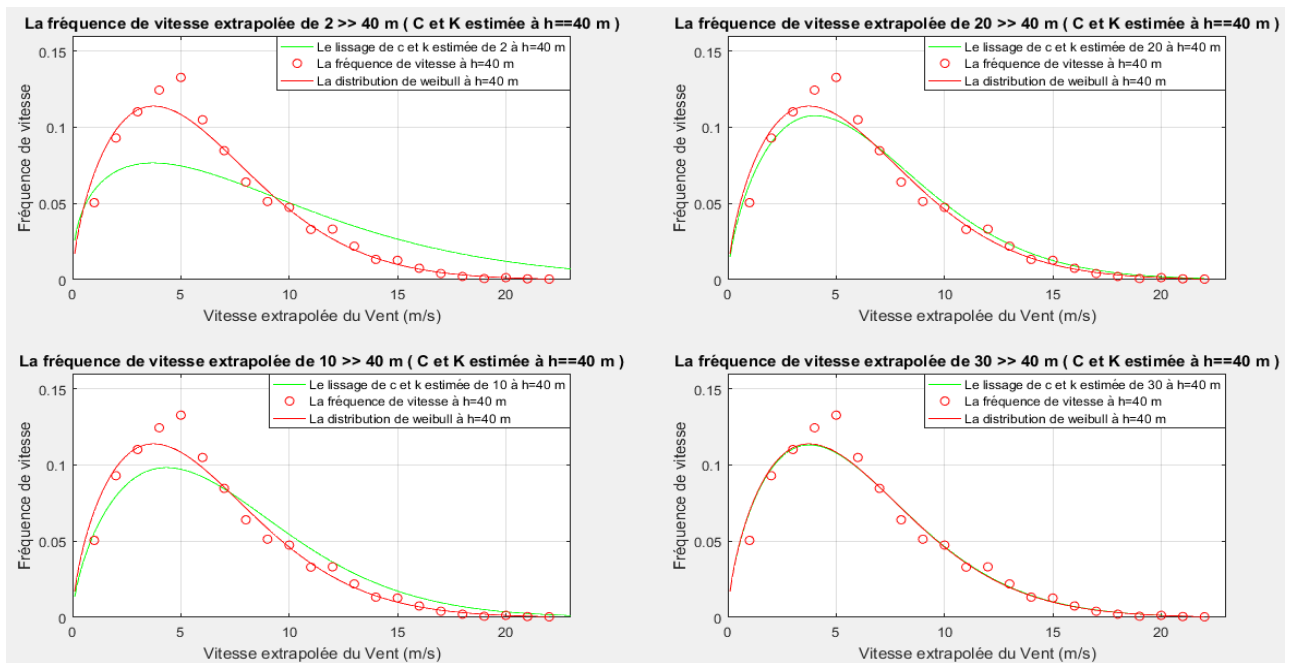


Figure 4.6 : Distribution de Weibull et fréquences selon la loi logarithmique

On remarque que l’allure de la courbe de distribution se rapproche de celle mesurée à 40 m au fur et à mesure que la hauteur augmente.

La figure 4.7 rassemble les tracés de distribution weibull estimés à partir de C et k de chaque extrapolation des vitesses collectées des hauteurs 2, 10, 20, et 30 m vers la hauteur de 40 m et le tracé de distribution à partir de C et k estimée des données de la vitesses brutes collectées à 40 m, et ce avec un pas de 1 m/s.

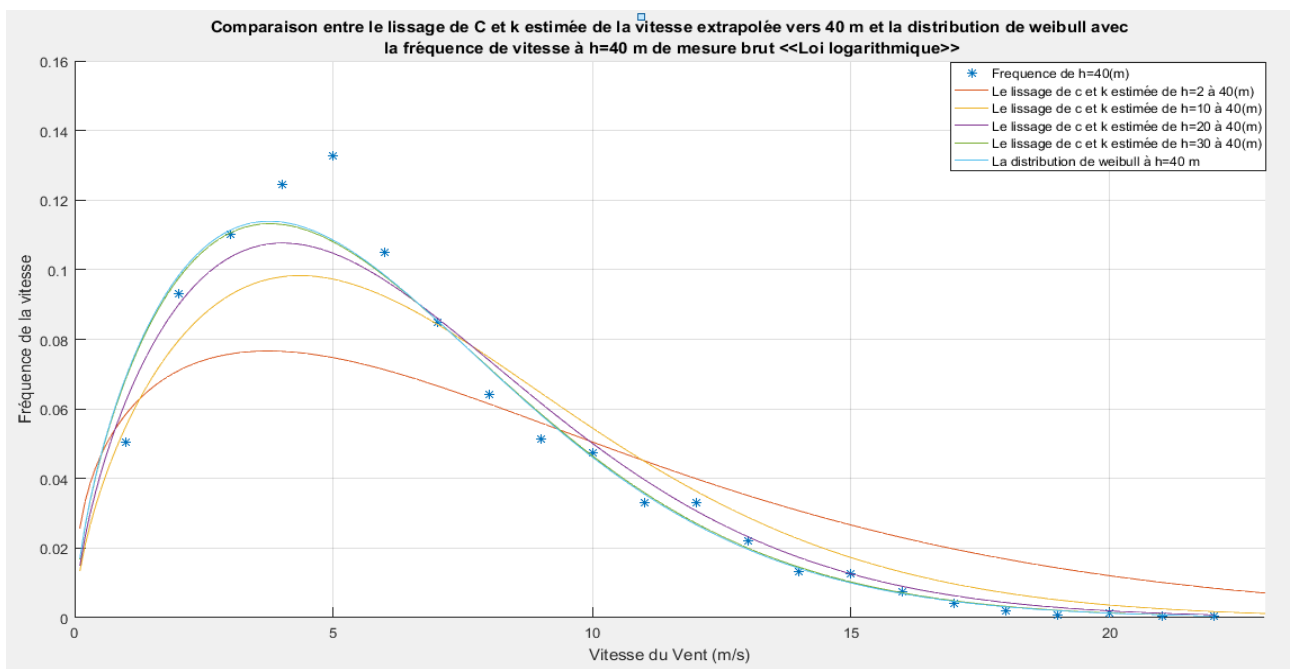


Figure 4.7 : Tracés comparatifs des résultats à différentes hauteur avec le résultat de mesures brutes à 40 m selon la loi logarithmique

On remarque que le tracé de 30 vers 40 m donne de bon résultats ce qui implique que cette loi s’adapte bien pour l’extrapolation des vitesses à court terme.

Au tableau 4.4 sont affichés les modes des distributions qui semblent erronés lors de l'extrapolation de 2 à 40 m ce qui s'explique par la turbulence au niveau de la plus basse couche limite.

Tableau 4.4 : Modes des distributions selon la loi logarithmique

h=(m)	V2max (m/s)
2 >> 40	52.16
10 >> 40	23.55
20 >> 40	22.69
30 >> 40	21.83
Brut à 40	22

Au tableau 4.5 sont affichées les valeurs des paramètres de Weibull selon la loi logarithmique. On remarque qu'à partir de 10m, le facteur de forme varie peu mais que le facteur d'échelle varie avec une grande différence celle de la valeur à la mesure brute.

Tableau 4.5 : les paramètres de Weibull selon la loi logarithmique

Les paramètres De h vers h=40 m	C	k
h=2 m	9.58	1.38
h=10 m	7.78	1.64
h=20 m	7.14	1.64
h=30 m	6.77	1.63
h=40 m brut	6.73	1.63

L'extrapolation de 30 à 40 m présente des résultats très proches ceci est dû à la décroissance des effets mécaniques près du sol.

b- Loi de puissance

En figure 4.8 sont données les distributions de Weibull selon la loi de puissance (3.2).

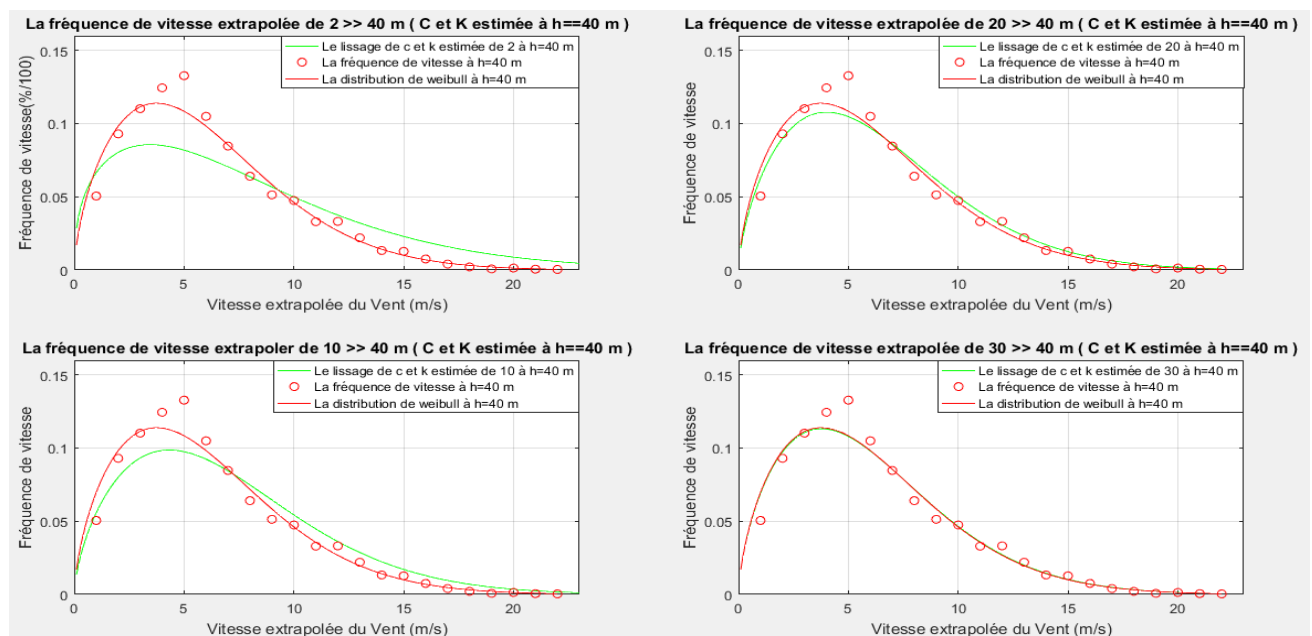


Figure 4.8 : Distribution de Weibull et fréquence selon la loi de puissance

La figure 4.8 indique que les résultats sont proches de ceux obtenus avec la loi logarithmique en matière d'allure de courbe qui tends en fonction de la hauteur à ce confondre avec la distribution brute de 40 m.

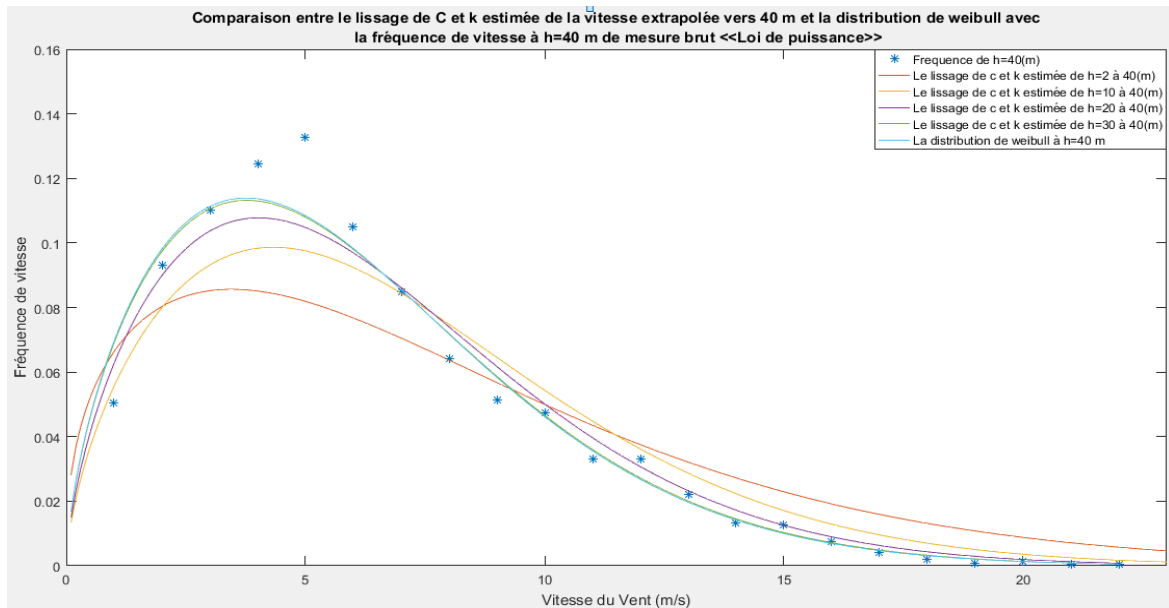


Figure 4.9 : Tracés comparatifs des résultats à différentes hauteurs avec le résultat de mesures brutes à 40 m selon loi de puissance

Les résultats obtenue par la loi de puissance sont plus adéquat lors de l'extrapolation de faibles hauteurs vers 40 m. En effet, même le mode des faibles hauteurs diminuent et se rapprochent de ceux obtenus par les mesures brutes en 40m, tel que montré au tableau 4.6.

Tableau 4.6 : Modes des distributions selon la loi de puissance

h=(m)	V2max (m/s)
2 >> 40	46.62
10 >> 40	23.44
20 >> 40	22.67
30 >> 40	21.83
Brut à 40	22

Au tableau 4.7 sont affichées les valeurs des paramètres de weibull déterminé à partir de la loi de puissance (3.2).

Tableau 4.7 : les paramètres de Weibull selon la loi de puissance

Les paramètres De h vers h=40 m	C	k
h=2 m	8.58	1.39
h=10 m	7.77	1.63
h=20 m	7.13	1.64
h=30 m	6.77	1.63
h=40 m brut	6.73	1.63

Même remarque avec la loi logarithmique ou les valeurs se rapprochent à partir de la hauteur 10m du sol

c- Loi de puissance 1/7

En figure 4.10 sont données l'extrapolation selon la loi de puissance 1/7 (3.3).

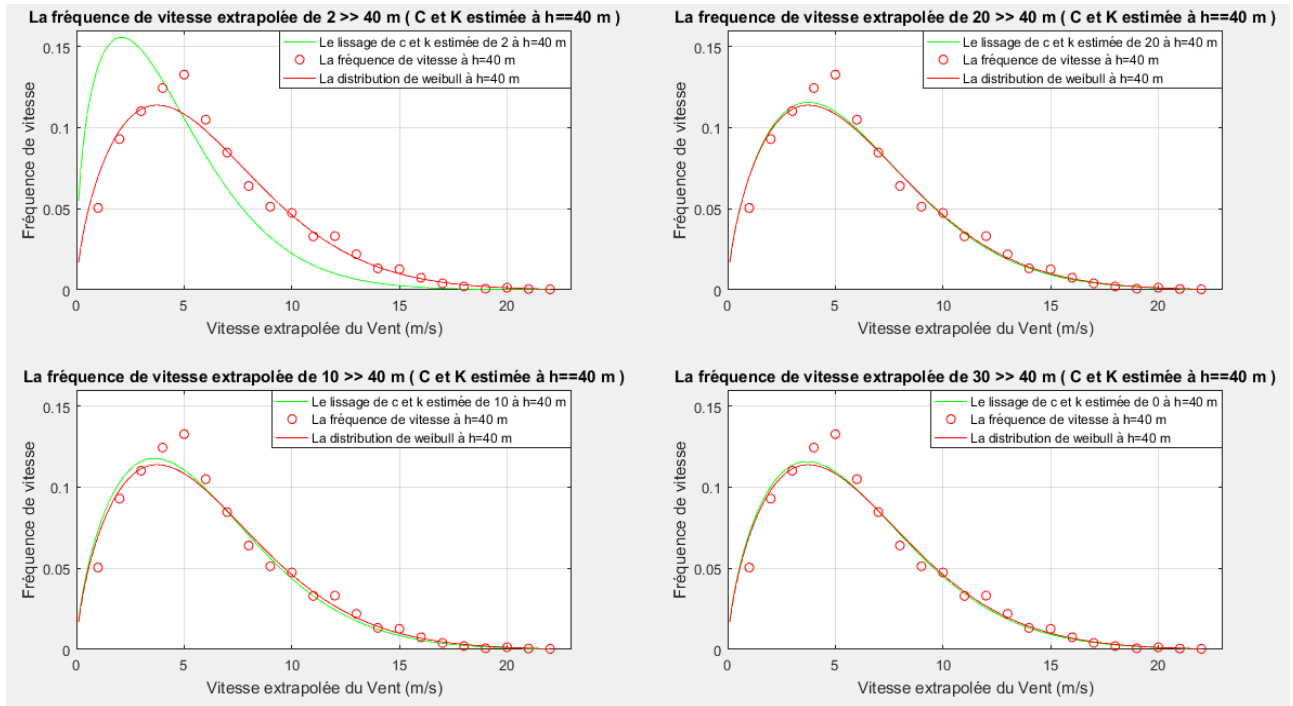


Figure 4.10 : Distribution de Weibull et fréquence selon la loi de puissance 1/7

La loi de puissance 1/7 indique de meilleurs résultats ou on constate que la seule allure de distribution qui s'éloigne est celle de l'extrapolation de la vitesse de 2 m vers 40 m de la hauteur alors que les autres allures présentent des ajustements plus proches du tracé de la distribution des mesures à 40 m de hauteur.

En figure 4.11 sont reportés toutes les distributions à des fins de comparaison.

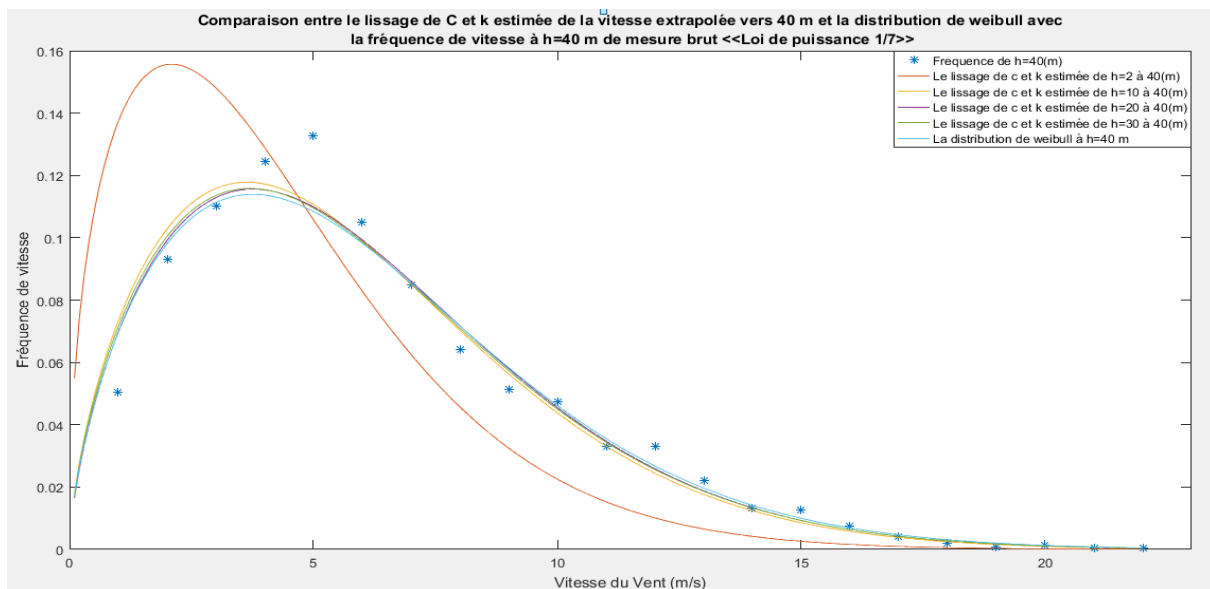


Figure 4.11 : Tracés comparatifs des résultats à différentes hauteur avec le résultat de mesures brutes à 40 m selon la loi de puissance 1/7

On remarque que le seul tracé qui diverge est celui de l'extrapolation de 2 vers 40 m alors que les autres distributions sont confondues. Les modes données au tableau 4.8

Tableau 4.8 : Modes de distribution selon la loi de puissance 1/7

h=(m)	V2max (m/s)
2 >> 40	25.31
10 >> 40	19.62
20 >> 40	21.08
30 >> 40	21.25
Brut à 40	22

Le tableau 4.9 affichée les valeurs des paramètres de weibull. On remarque une forte concordance des facteurs de forme et une augmentation avec la hauteur d'extrapolation.

Tableau 4.9 : les paramètres de Weibull selon la loi de puissance 1/7

Les paramètres De h vers h=40 m	C	k
h=2 m	4.74	1.44
h=10 m	6.51	1.63
h=20 m	6.66	1.64
h=30 m	6.62	1.63
h=40 m brut	6.73	1.63

d- Loi de puissance modifiée

En figure 4.12 sont données l'extrapolation selon la loi de puissance modifiée selon l'équation 3.4.

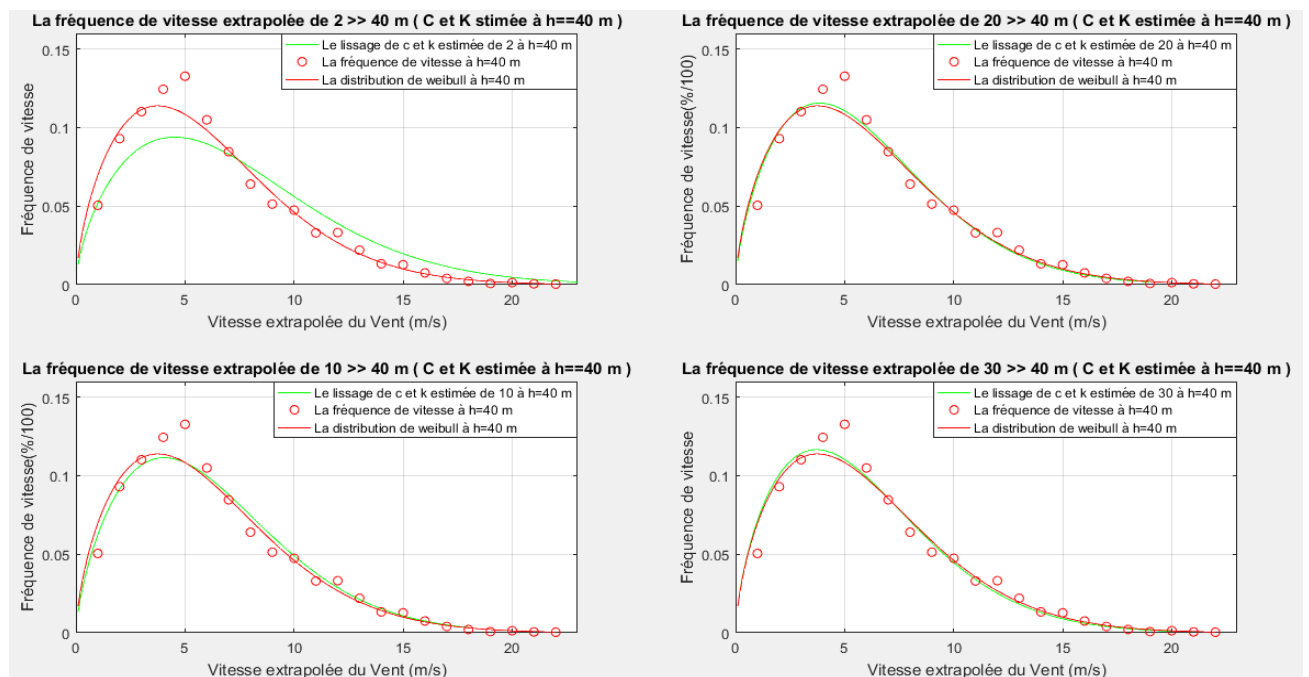


Figure 4.12 : Distribution de Weibull et fréquences selon la loi de puissance modifiée

On remarque que les distributions obtenues sont très proche de celles du modèle 1/7.

En figure 4.13 sont reportés toutes les distributions à des fins de comparaison.

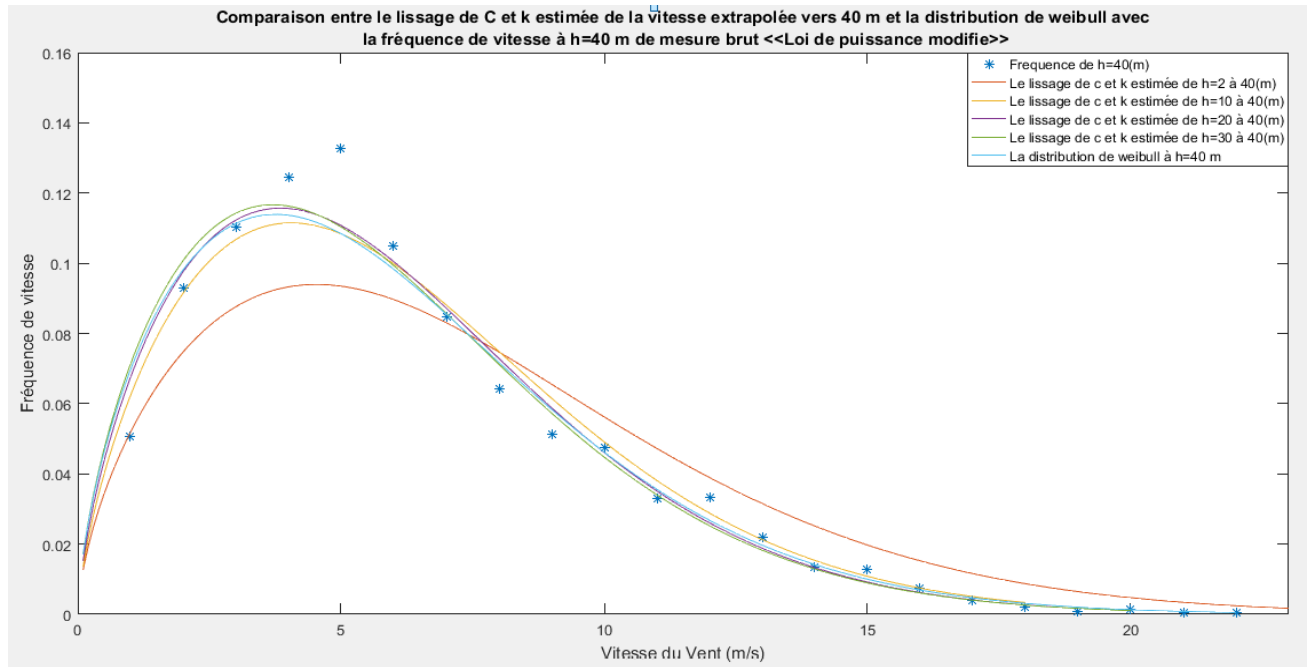


Figure 4.13 : Tracés comparatifs des résultats à différentes hauteur avec le résultat de mesures brutes à 40 m selon la loi de puissance modifiée

Les mêmes remarques avec le modèle de la loi de puissance 1/7

Le tableau 4.10 affichée la valeur maximal de la vitesse extrapolée pour les 4 hauteurs vers 40 m de la hauteur

Tableau 4.10 : Les valeurs maximales de la vitesse pour la loi de puissance modifiée

h=(m)	V2max (m/s)
2 >> 40	30.72
10 >> 40	18.86
20 >> 40	19.97
30 >> 40	20.63
Brut à 40	22

Le mode obtenu à 2 m de hauteur est plus réaliste puisqu'il ne dépasse pas les 30m/s.

Au tableau 4.11 sont affichées les valeurs des paramètres de Weibull. Les mêmes remarques avec le modèle de la loi de puissance 1/7.

Tableau 4.11 : les paramètres de Weibull selon la loi de puissance modifié

Les paramètres De h vers h=40 m	C	k	EPS C	EPS k
h=2 m	8.15	1.63	-21.10	0.26
h=10 m	6.96	1.68	-3.43	-2.84
h=20 m	6.69	1.66	0.65	-2.9
h=30 m	6.59	1.64	2.13	-0.53
h=40 m brut	6.73	1.63	0	0

e- Loi de puissance à coefficient variable

En figure 4.14 sont données l'extrapolation selon la loi de puissance à coefficient variable selon l'équation 3.5.

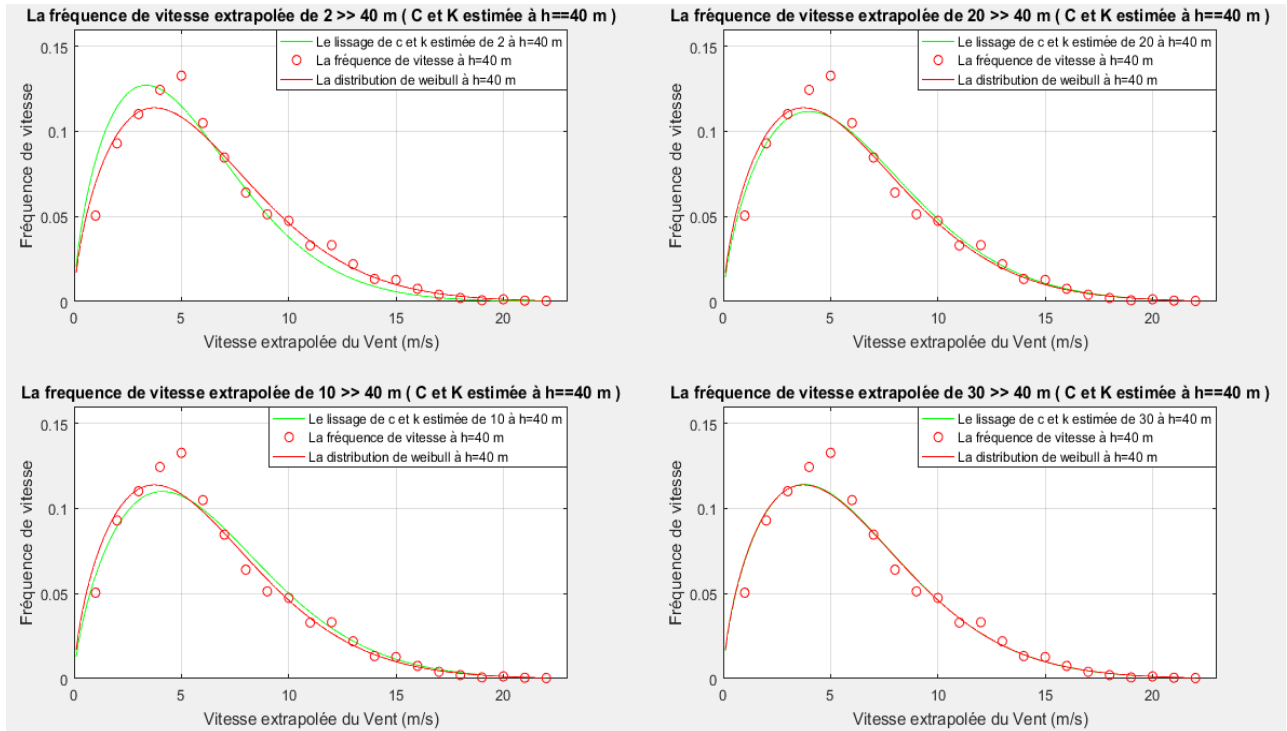


Figure 4.14 : Distribution de Weibull et fréquences selon la loi de puissance à coefficient variable

De même en figure 4.15 sont données les différents tracés.

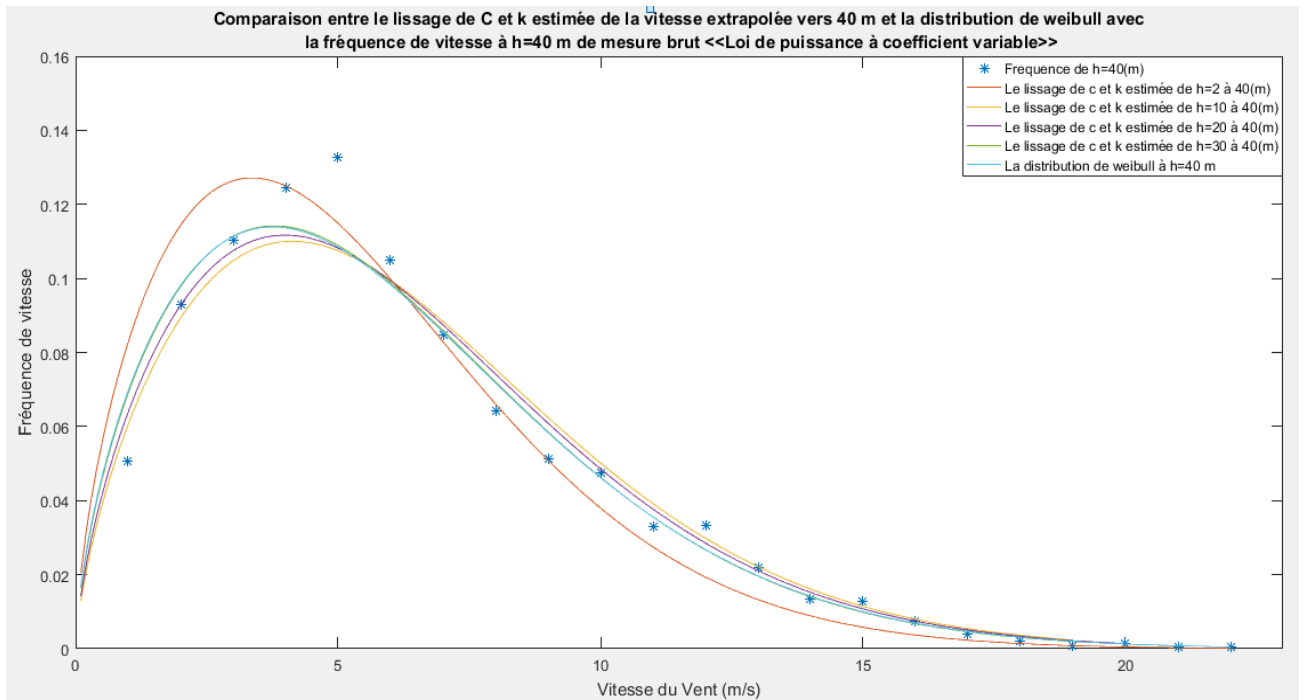


Figure 4.15 : Tracés comparatifs des résultats à différentes hauteur avec le résultat de mesures brutes à 40 m selon la loi de puissance à coefficient variable

A part le cas d'extrapolation de 2 à 40m qui présente une divergence du tracé par rapport à celui mesuré, on remarque que les extrapolations de 10, 20, 30 et 40 sont presque confondues et présentent une bonne concordance ce qui démontre l'effet de la rugosité du sol sur le profil vertical du vent.

Au tableau 4.12 sont affichées les Modes des distributions de la vitesse extrapolée pour les 4 hauteurs vers 40 m de la hauteur.

Tableau 4.12 : Modes de la distribution de la vitesse pour la loi de puissance à coefficient variable

h=(m)	V2max (m/s)
2 >> 40	22.78
10 >> 40	19.15
20 >> 40	20.71
30 >> 40	21.08
Brut à 40	22

Ce modèle présente des modes proches de celui de la distribution des mesures à 40 m ce qui implique un bon ajustement pour l'extrapolation à court terme.

Au tableau 4.13 sont affichées les valeurs des paramètres de Weibull.

Tableau 4.13 : Paramètres de Weibull selon la loi de puissance à coefficient variable

Les paramètres	C	k
De h vers h=40 m		
h=2 m	6.03	1.63
h=10 m	7.06	1.68
h=20 m	6.93	1.66
h=30 m	6.73	1.64
h=40 m brut	6.73	1.63

On remarque une nette augmentation des performances des résultats qui sont proches de ceux obtenus à 40 m.

4.3.2. Extrapolation à long terme

L'extrapolation verticale des paramètres de Weibull C et k a été réalisée suivant les lois :

- Le modèle de Justus et Mikhaïl
- Le modèle modifié de Justus
- Le modèle modifié de Mikhaïl

a- Modèle de Justus et Mikhaïl

En Figure 4.16 le tracé de distribution de weibull et la fréquence en fonction de la vitesse selon le modèle de Justus et Mikhaïl (3.6).

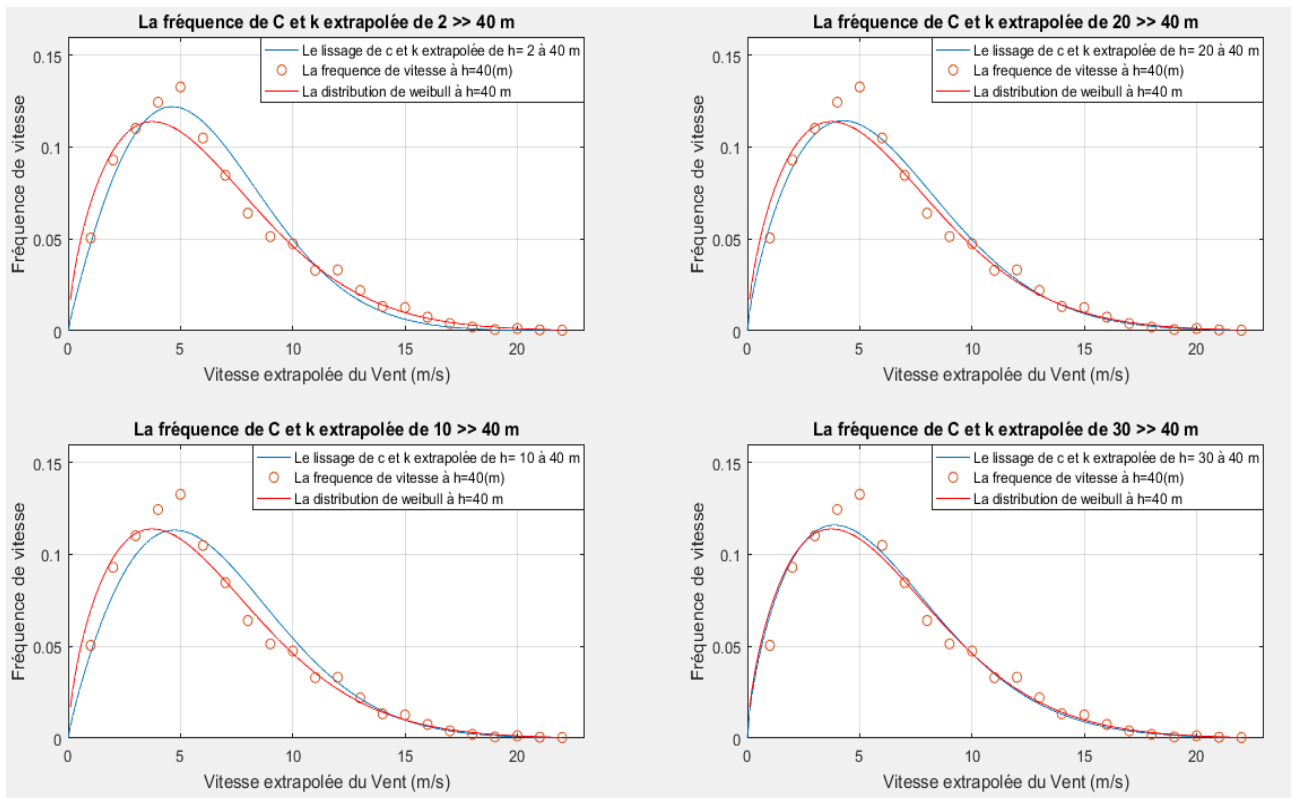


Figure 4.16 : Distribution de Weibull et fréquences selon le modèle de Justus et Mikhaïl

De même en figure 4.17 sont données les différents tracés.

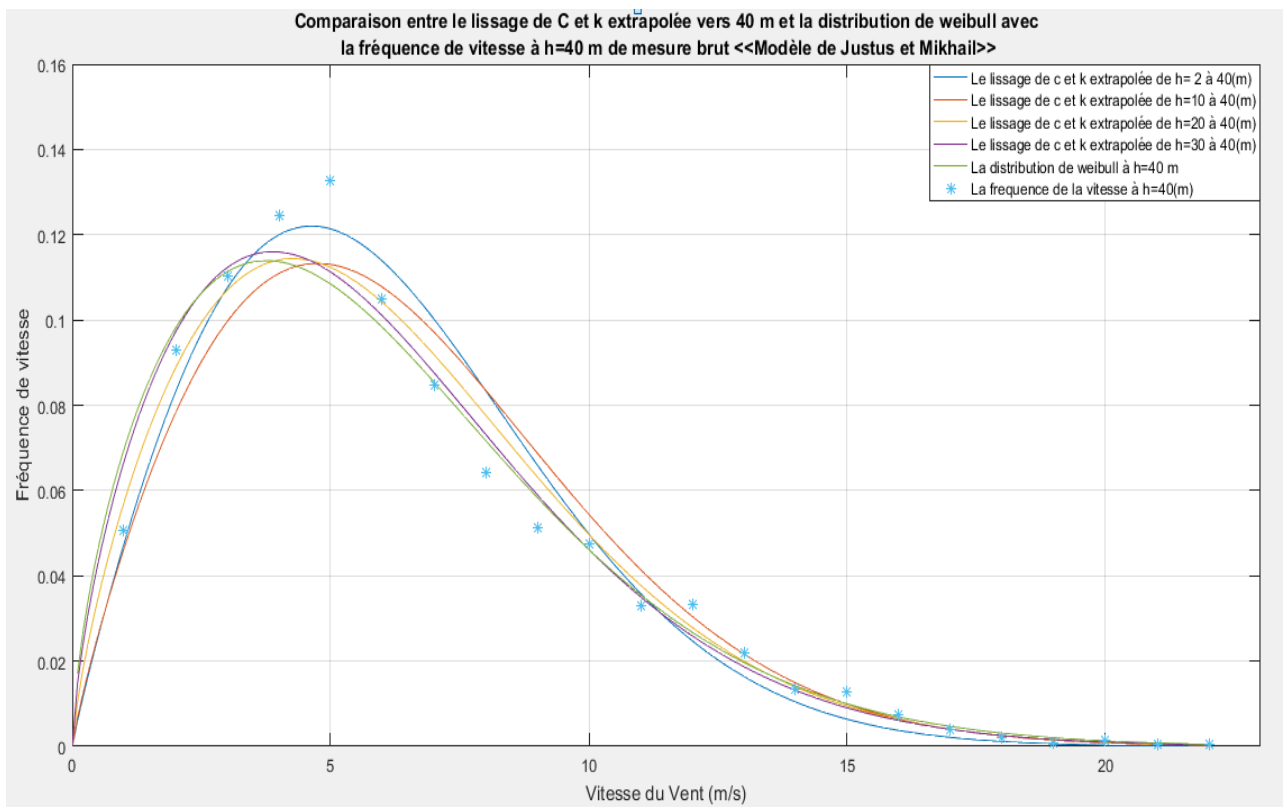


Figure 4.17 : Tracés comparatifs des résultats à différentes hauteurs avec le résultat de mesures brutes à 40 m selon le modèle de Justus et Mikhaïl

Au tableau 4.14 sont affichées les valeurs des paramètres de Weibull C et k.

Tableau 4.14 : les paramètres de Weibull selon le modèle de Justus et Mikhaïl

Les paramètres De h vers h=40 m	C	k
h=2 m	6.83	1.91
h=10 m	7.22	1.85
h=20 m	6.93	1.75
h=30 m	6.69	1.67
h=40 m brut	6.73	1.63

Les résultats de ce modèle sont le tracé des distributions ajustées et comparées en figure 4.16 avec la distribution tracée en fonction des facteurs k et c obtenus à partir des mesures à 40 m. On remarque la même allure avec un rapprochement vers celle mesurée en fonction de la hauteur. Par ailleurs, les modes obtenus sont très proches et presque égaux pour les tracés extrapolés ce qui implique que ce modèle présente une bonne concordance. Les résultats sont acceptables et varient très peu autour des valeurs obtenus ce qui implique que le modèle de Justus et Mikhaïl présente de bons résultats.

b- Modèle modifiée de Justus

En Figure 4.18 le tracé de distribution de weibull et la fréquence en fonction de la vitesse selon le modèle modifiée de Justus (équation 3.7).

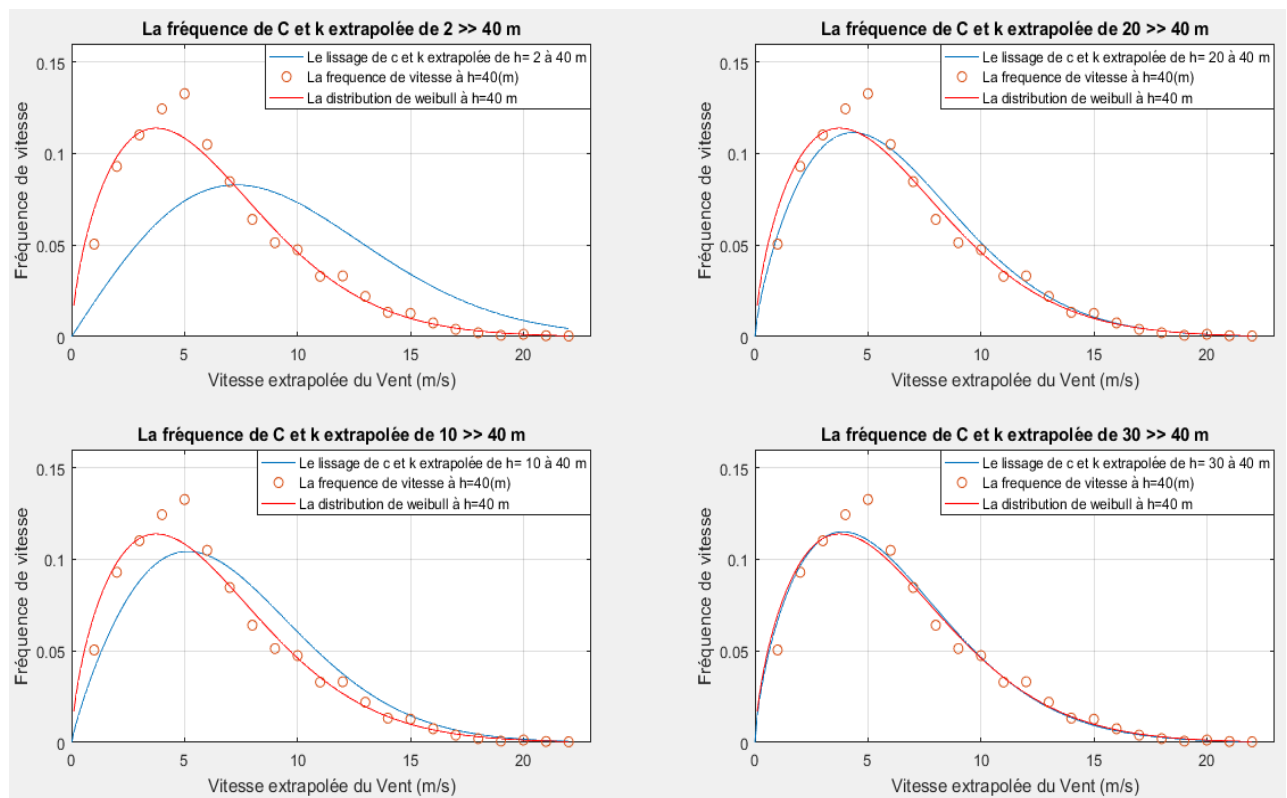


Figure 4.18 : Distribution de Weibull et fréquences selon le modèle modifiée de Justus

On remarque une nette différence dans le tracé des distributions comparé à celui mesuré à 40 m. En effet, la figure 4.18 montre que seule l’extrapolation de 30 à 40 m présente une bonne concordance.

On remarque que figure 4.19 le tracé de l'extrapolation de 30 à 40 m présentent une bonne concordance avec les mesures brutes.

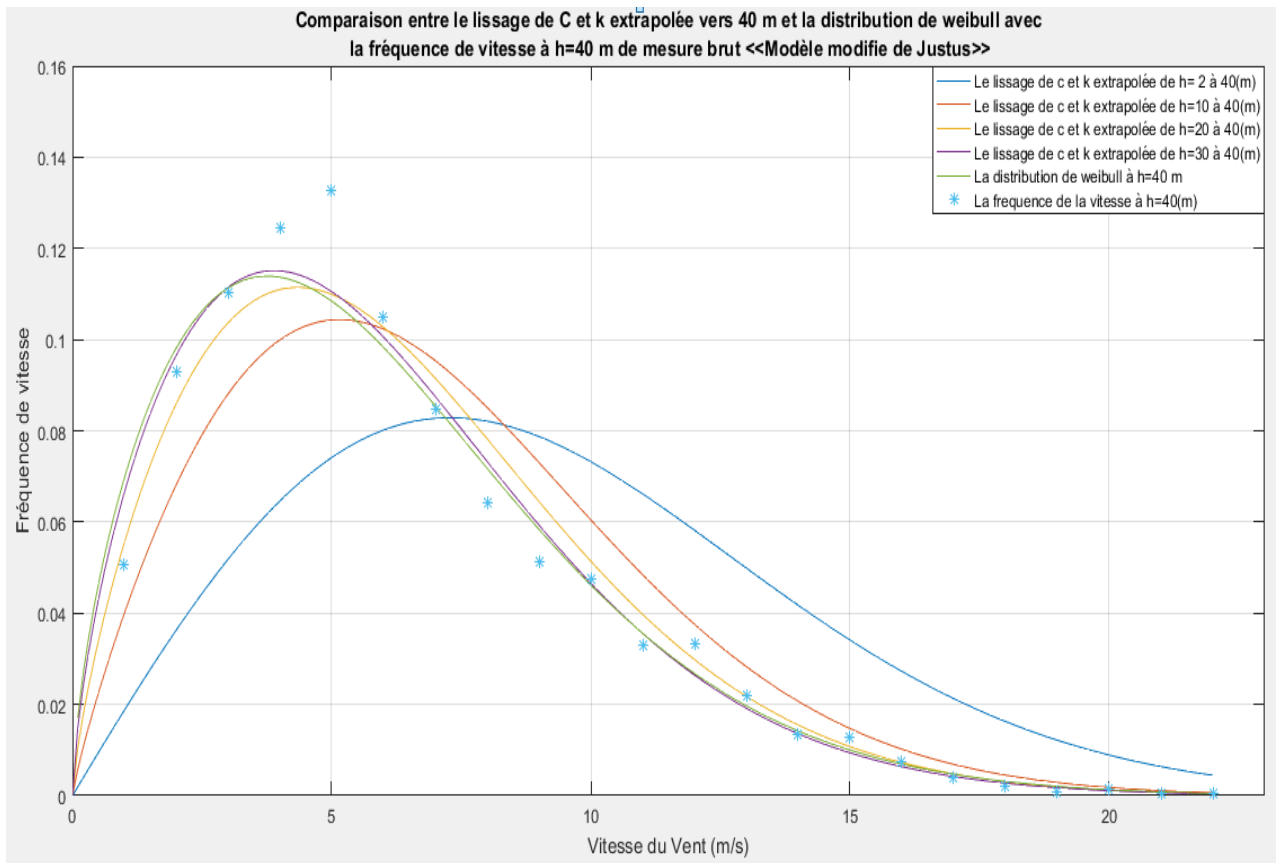


Figure 4.19 : Tracés comparatifs des résultats à différentes hauteur avec le résultat de mesures brutes à 40 m selon le modèle modifiée de Justus

Au tableau 4.5 sont affichée les valeurs des paramètres de Weibull selon extrapolé selon le modèle modifiée de Justus

Tableau 4.15 : les paramètres de Weibull selon le modèle modifiée de Justus

Les paramètres De h vers h=40 m	C	k
h=2 m	10.33	1.99
h=10 m	7.84	1.85
h=20 m	7.1	1.74
h=30 m	6.73	1.67
h=40 m brut	6.73	1.63

Les valeurs confirment le fait que seules les valeurs de k et C obtenus à 30 m sont proches de ceux obtenus à partir des mesures.

c- Modèle modifiée de Mikhaïl

En Figure 4.20 le tracé de distribution de weibull et la fréquence en fonction de la vitesse selon le modèle modifiée de Mikhaïl (selon l'équation 3.8).

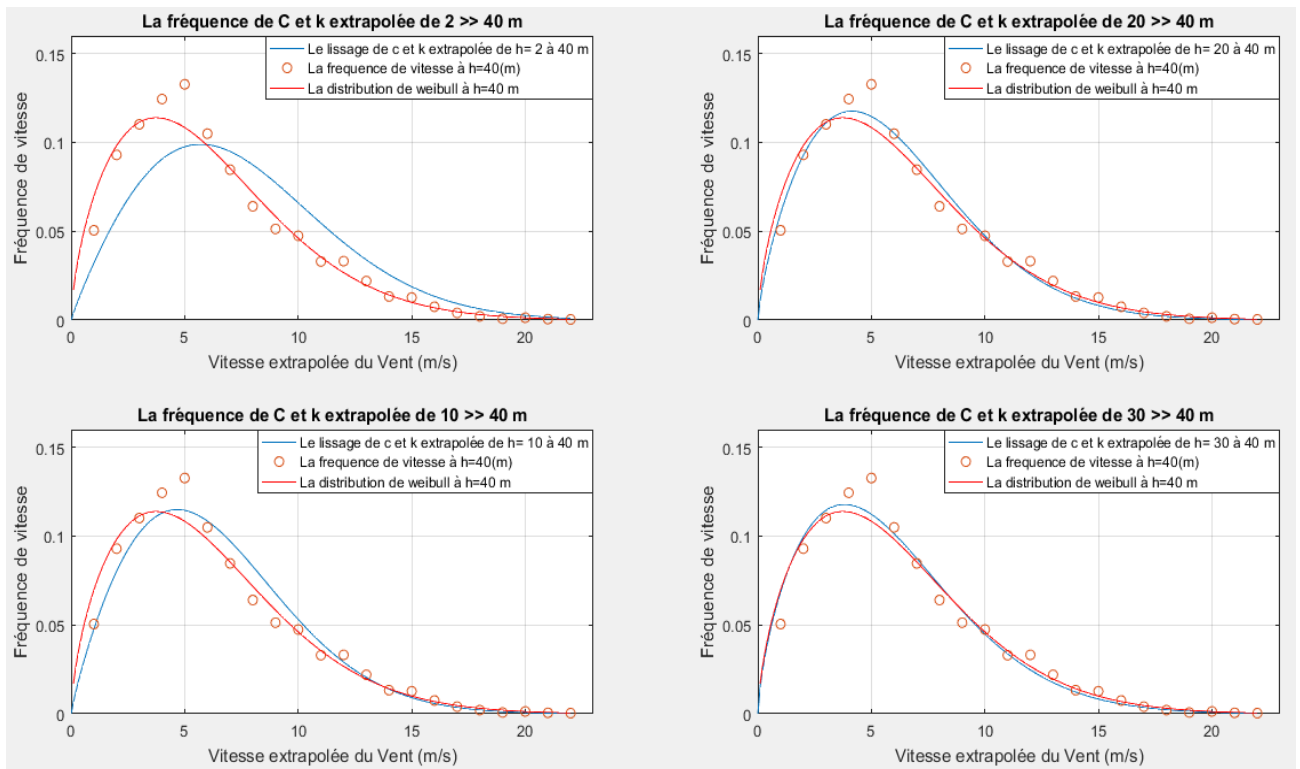


Figure 4.20 : Distribution de Weibull et fréquences selon le modèle modifiée de Mikhaïl

On remarque que les modes des distributions est très proches mais que les allures sont décalées sauf pour l'extrapolation de 30 à 40 m.

En figure 4.21 monte que la même remarque que celle du modèle précédent peut être appliquée.

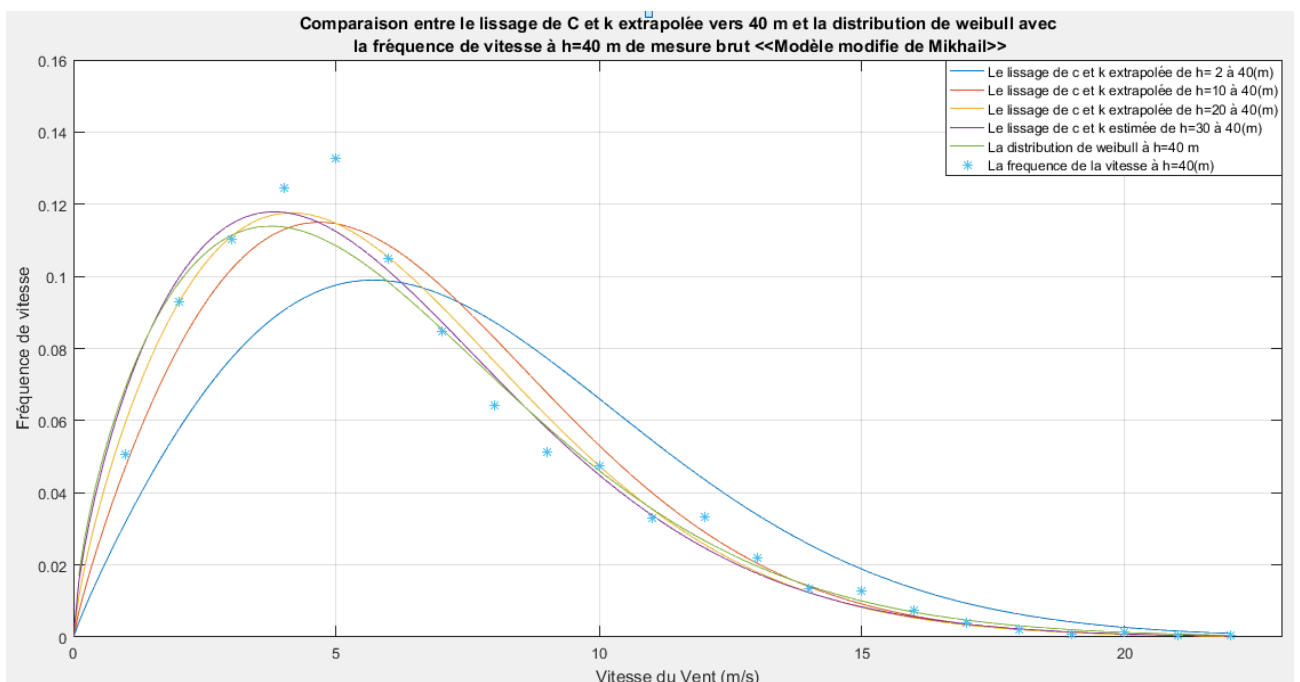


Figure 4.21 : Tracés comparatifs des résultats à différentes hauteur avec le résultat de mesures brutes à 40 m selon le modèle modifiée de Mikhaïl

Au tableau 4.16 sont affichée les valeurs des paramètres de Weibull selon le modèle modifiée de Mikhaïl

Tableau 4.16 : les paramètres de Weibull selon le modèle modifié de Mikhaïl

Les paramètres De h vers h=40 m	C	k
h=2 m	8.42	1.91
h=10 m	7.11	1.85
h=20 m	6.74	1.75
h=30 m	6.58	1.67
h=40 m brut	6.73	1.63

On remarque une forte divergence du modèle qui s'atténue lorsque l'extrapolation se fait à partir d'une hauteur proche de celle mesurée.

4.4. Choix du modèle adéquat

Afin de déterminer le modèle adéquat, nous procédons au calcul de l'erreur relative des facteurs de Weibull selon l'équation donnée au chapitre 2 et ce pour le cas court et long terme.

4.4.1. A court terme

Au tableau 4.17 sont données les erreurs relatives des paramètres de Weibull selon les modèles d'extrapolation à court terme.

Tableau 4.17 : Erreurs relatives des paramètres de Weibull selon les modèles d'extrapolation à court terme.

L'erreur Relative% Model	2 m à 40 m		10 m à 40 m		20 m à 40 m		30 m à 40 m	
	εC	εk	εC	εk	εC	εk	εC	εk
Loi logarithmique	-42.36	15.59	-15.86	0.026	-6.09	-0.62	-0.59	0.09
Loi de puissance	-27.50	14.60	-15.43	0.066	-5.98	-0.63	-0.59	0.09
Loi de puissance 1/7	29.53	11.56	3.31	-0.024	1.14	-0.77	1.14	-0.77
Loi de puissance modifiée	-21.10	0.26	-3.43	-2.84	0.65	-2.09	2.13	-0.53
Loi de puissance à coefficient variable	10.45	0.11	-4.94	-3.12	-2.89	-2.07	0.03	-0.51

On remarque que les erreurs du facteur de forme k sont importantes lors de l'extrapolation de 2 à 40m. En effet, le profil est fortement influencé par les frottements au sol, la topographie, les obstacles et la végétation. Le premier, second et troisième modèles présentent des erreurs importantes et ne peuvent être utilisés pour une quelconque extrapolation en de vitesse mesurée à des niveaux inférieurs à 10 m du sol. Le facteur C présente les mêmes phénomènes et/ou les deux premières lois présentent une forte divergence jusqu'à la hauteur de 20 m du sol.

En figure 4.22 sont données les erreurs relatives des facteurs k et C de weibull selon la loi logarithmique.

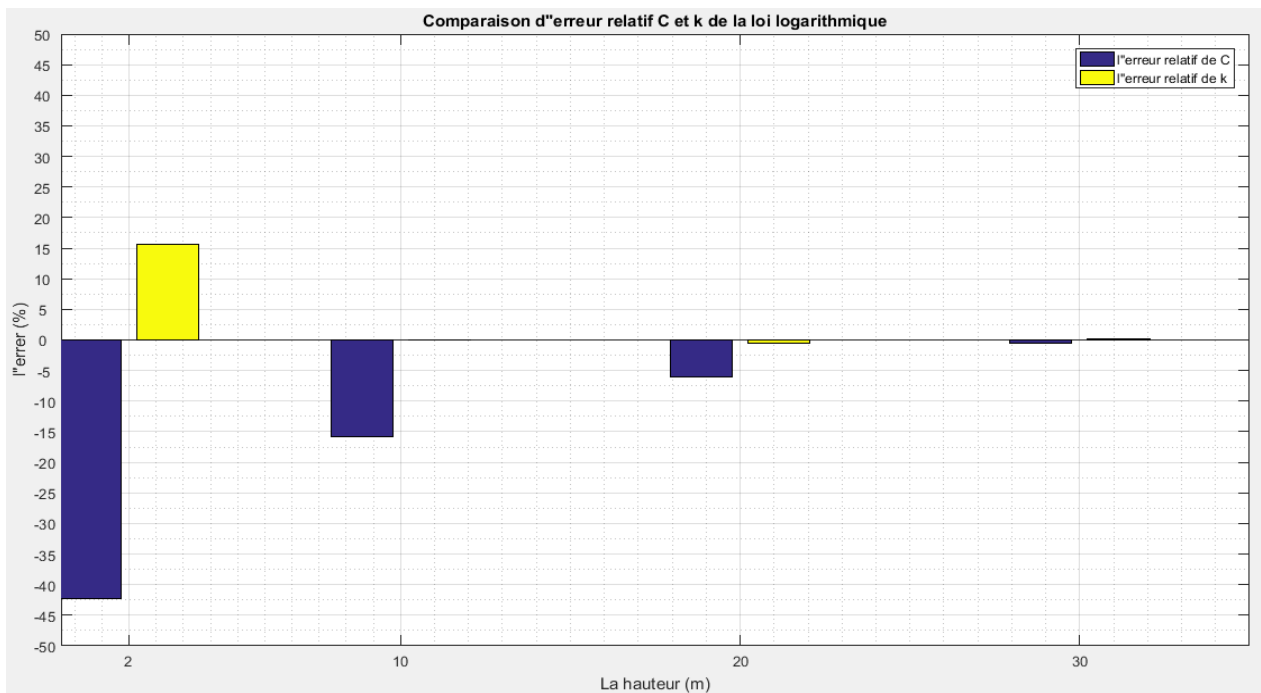


Figure 4.22 : Erreur relative à différents hauteurs selon la loi logarithmique

Les valeurs diminuent selon la diminution de la différence de la hauteur la remarque est dans la figure 4.22.

En figure 4.23 sont données les erreurs relatives des facteurs k et C de weibull selon la loi de puissance.

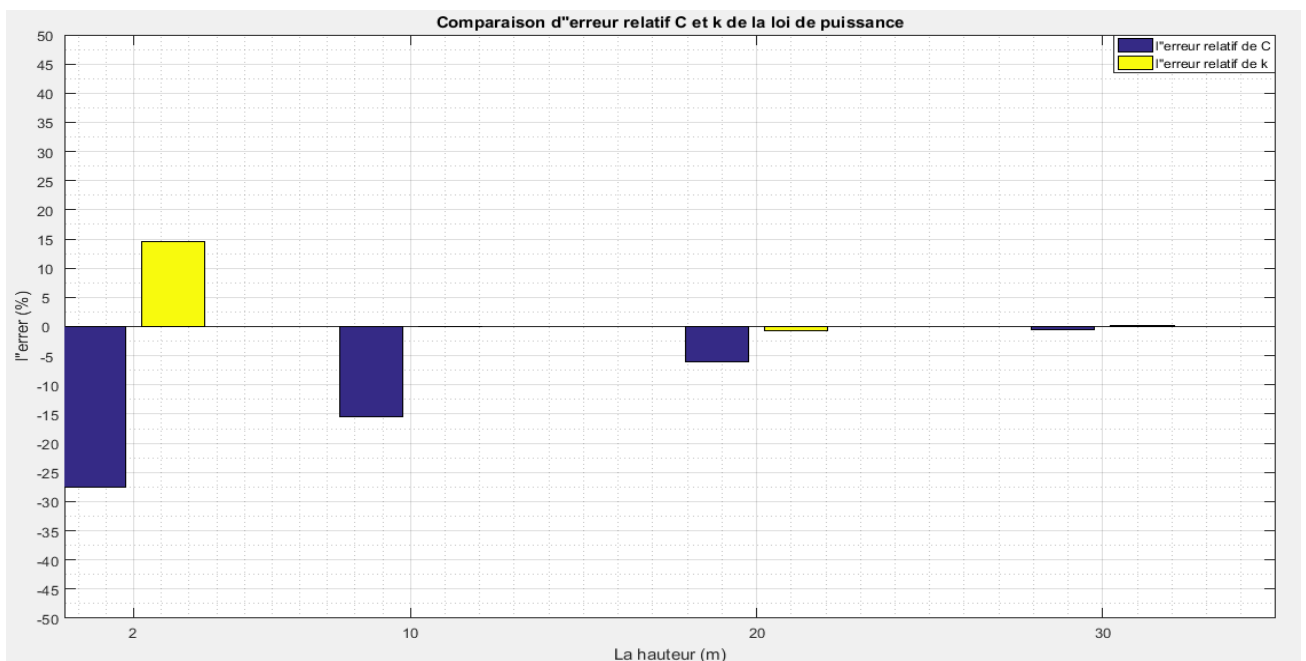


Figure 4.23 : Erreur relative à différents hauteurs selon la loi de puissance

En figure 4.24 sont données les erreurs relatives des facteurs k et C de weibull selon la loi de puissance 1/7.

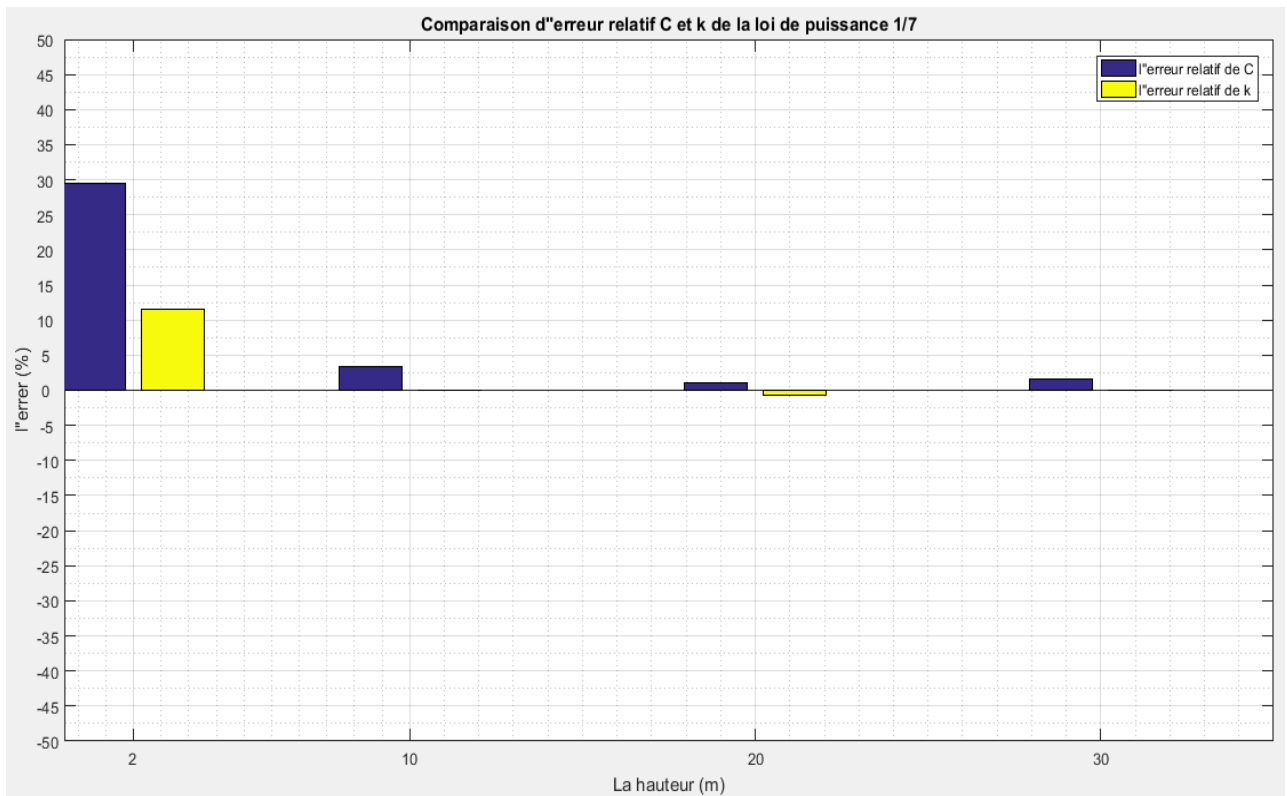


Figure 4.24 : Erreur relative à différents hauteurs selon la loi de puissance 1/7

En figure 4.25 sont données les erreurs relatives des facteurs k et C de weibull selon la loi de puissance modifiée.

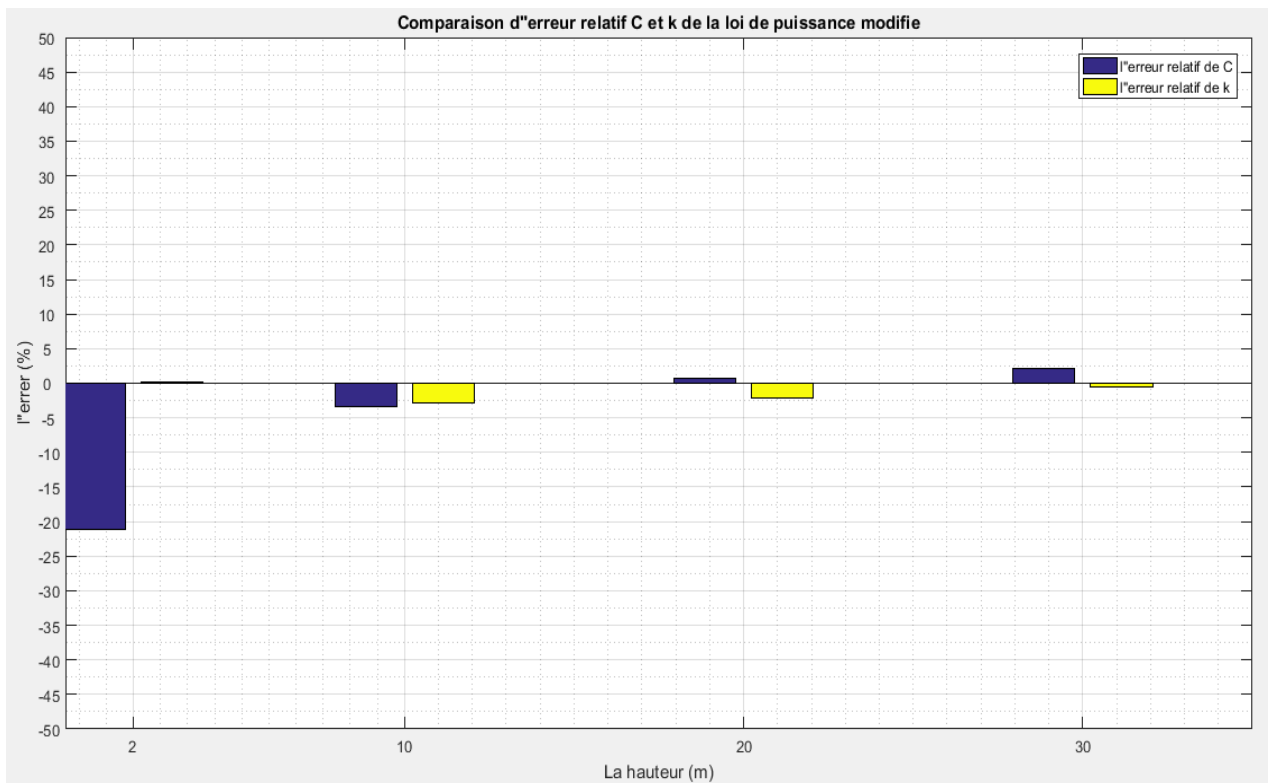


Figure 4.25 : Erreur relative à différents hauteurs selon la loi de puissance modifiée

En figure 4.26 sont données les erreurs relatives des facteurs k et C de weibull selon la loi de puissance à coefficient variable.

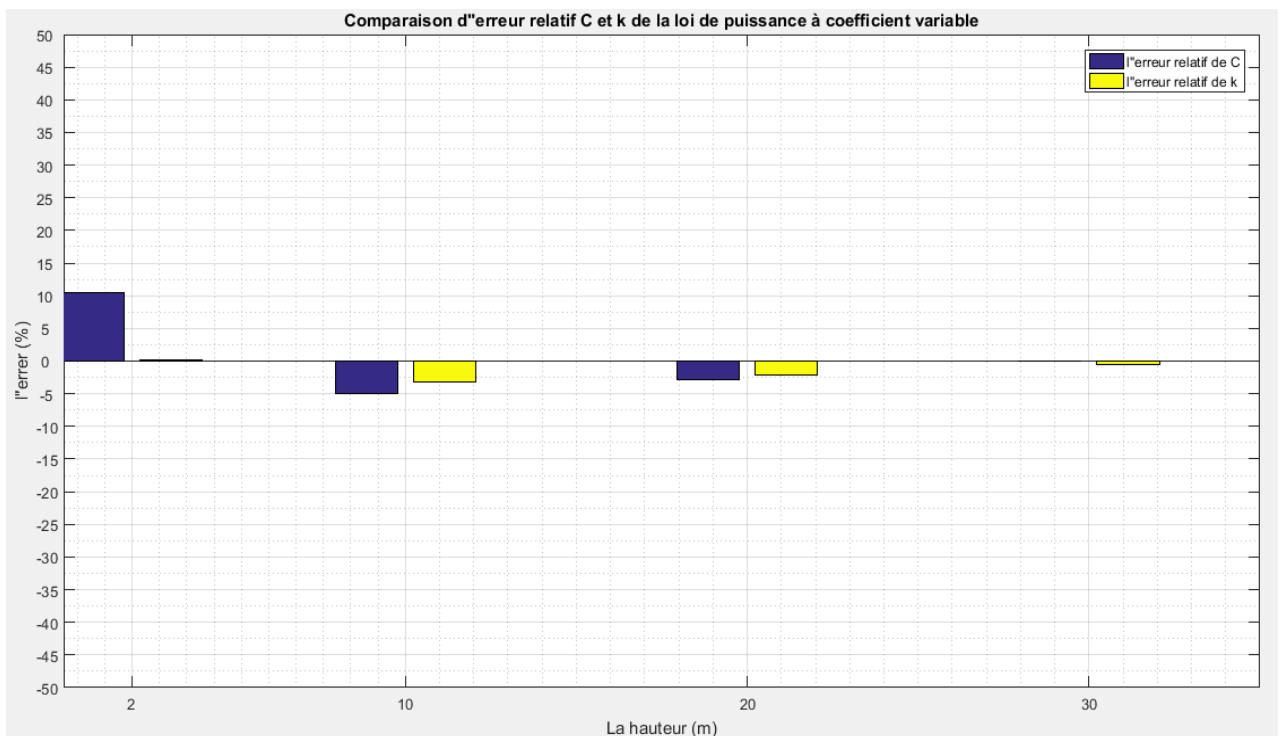


Figure 4.26 : Erreur relative à différents hauteurs selon la loi de puissance à coefficient variable

Les figures indiquent une surestimation des valeurs pour la hauteur de 2 m à savoir près du sol et une sous-estimation des valeurs pour des hauteurs au-delà de 10 m et ce pour pratiquement toutes les lois. On remarque clairement que la loi la plus adaptée est celle relative à la variation du facteur de rugosité à savoir la loi à coefficient variable.

4.4.2. A long terme

Au tableau 4.18 donné les erreurs relatives pour les lois à long terme.

Tableau 4.18 : Erreurs relatives des paramètres de Weibull selon les modèles d'extrapolation à long terme

L'erreur Relative % Modèle	2 m à 40 m		10 m à 40 m		20 m à 40 m		30 m à 40 m	
	ϵC	ϵk	ϵC	ϵk	ϵC	ϵk	ϵC	ϵk
Modèle de Justus et Mikhail	-1.40	-17.15	-7.27	-13.64	-2.93	-7.31	0.67	-2.65
Modèle modifié de Justus	-53.48	-22.37	-16.40	-13.64	-5.41	-6.86	0.04	-2.36
Modèle modifié de Mikhail	-25.02	-17.15	-5.67	-13.64	-0.12	-7.31	2.25	-2.65

On remarque que les k et C estimés à partir des différentes lois d'extrapolation présentent une sous-estimation. Cette dernière atteint des proportions importantes pour les faibles hauteurs. Les erreurs relatives sur le facteur k sont toutefois, plus importantes que pour le court terme.

En figure 4.27 sont données les erreurs relatives des facteurs k et C de weibull selon le modèle de Justus et Mikhaïl.

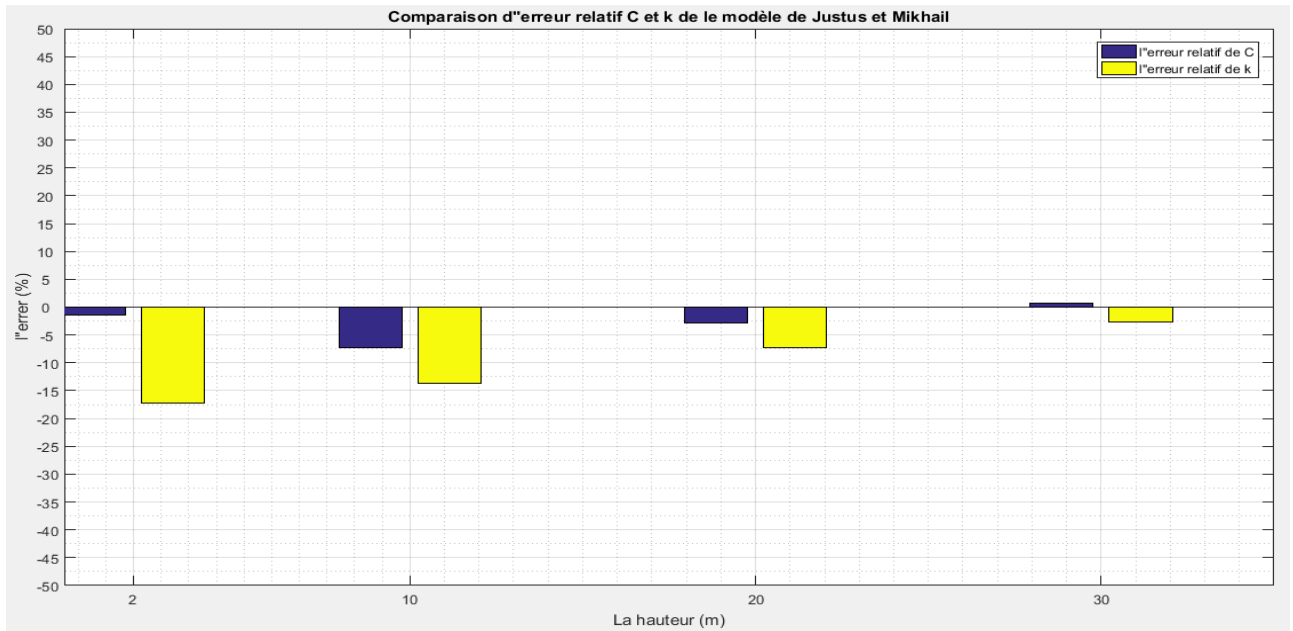


Figure 4.27 : l'erreur relative à différents hauteurs selon le Modèle de Justus et Mikhaïl

En figure 4.28 sont données les erreurs relatives des facteurs k et C de weibull selon le modèle modifié de Justus.

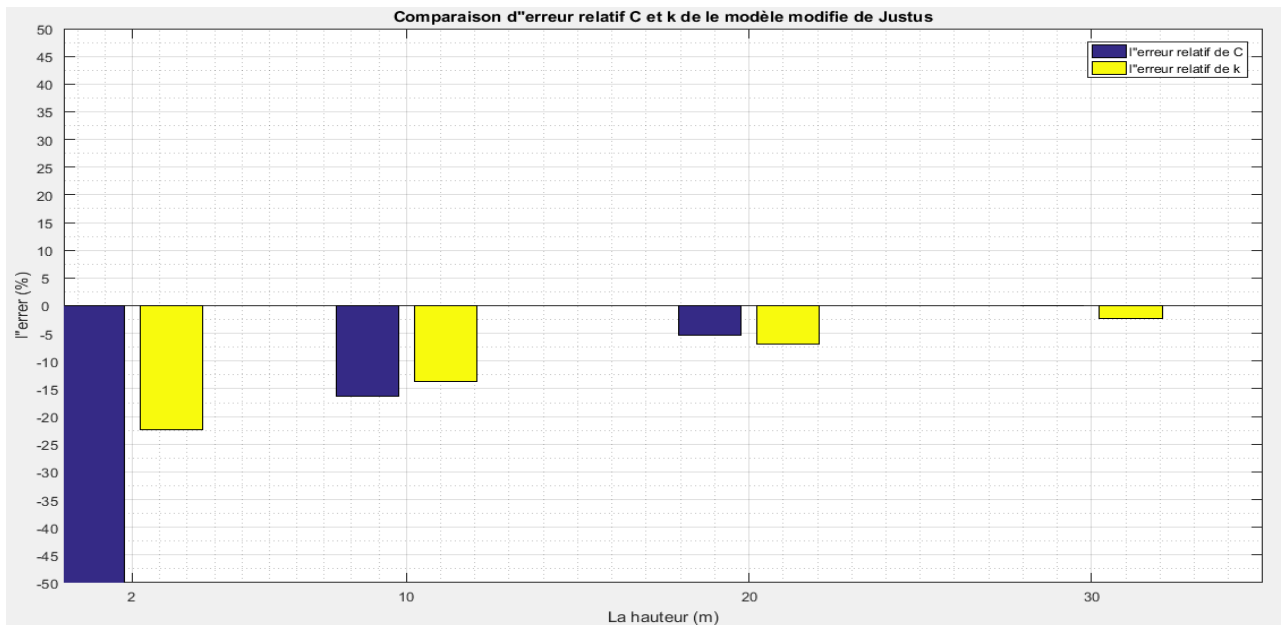


Figure 4.28 : l'erreur relative à différents hauteurs selon le Modèle modifié de Justus

En figure 4.29 sont données les erreurs relatives des facteurs k et C de weibull selon le modèle modifié de Mikhaïl.

On remarque que les bars sont diminués leur hauteur à partir de la variation de la hauteur de l'extrapolation.

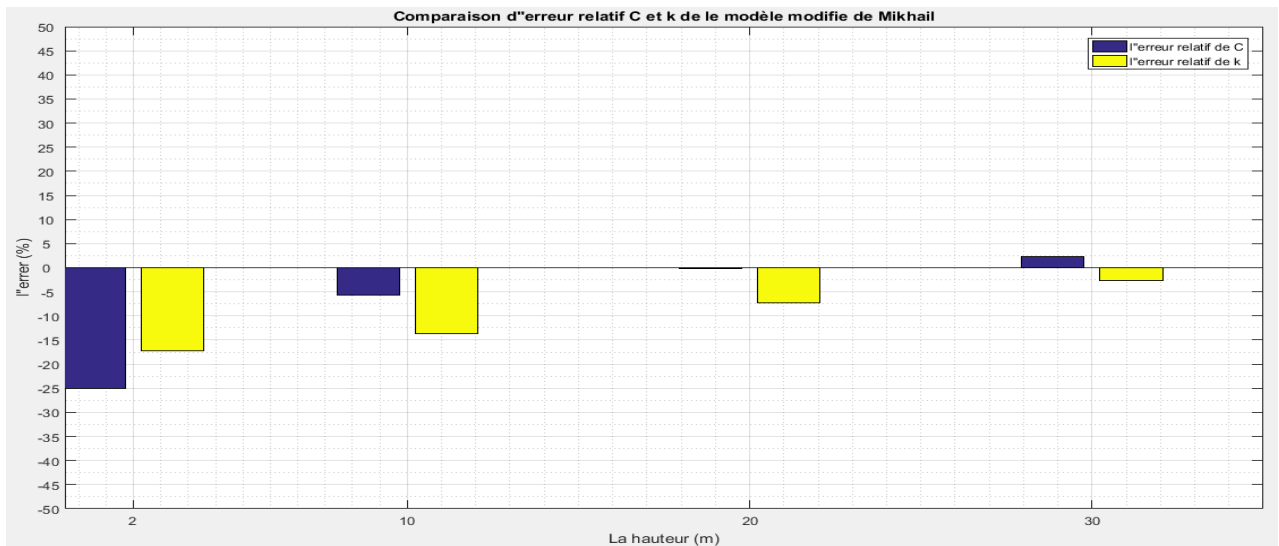


Figure 4.29 : Erreur relative à différents hauteurs selon le Modèle modifie de Mikhail

Les figures indiquent que pour le facteur C représentant la vitesse moyenne du vent, les résultats sont proches mais par contre des erreurs importantes sont constatées pour le facteur de forme.

En fin le modèle de Justus et Mikhaïl présentent de bons résultats et peut être choisi comme étant la loi le plus adaptée pour l'extrapolation des facteurs de weibull.

4.5. Vérification les résultats du modèle adéquat par le tracé de profil du vent

Pour faire la vérification des résultats obtenus à partir les traitements des données, les calculs des paramètres de weibull et les erreurs relatives, on trace les profils du vent selon les modèles d'extrapolation pour les deux cas à court et long terme.

4.5.1. Les profile du vent à partir les modèles à court terme

En figure 4.30 sont affichées les tracés des profils du vent pour le cas à court terme.

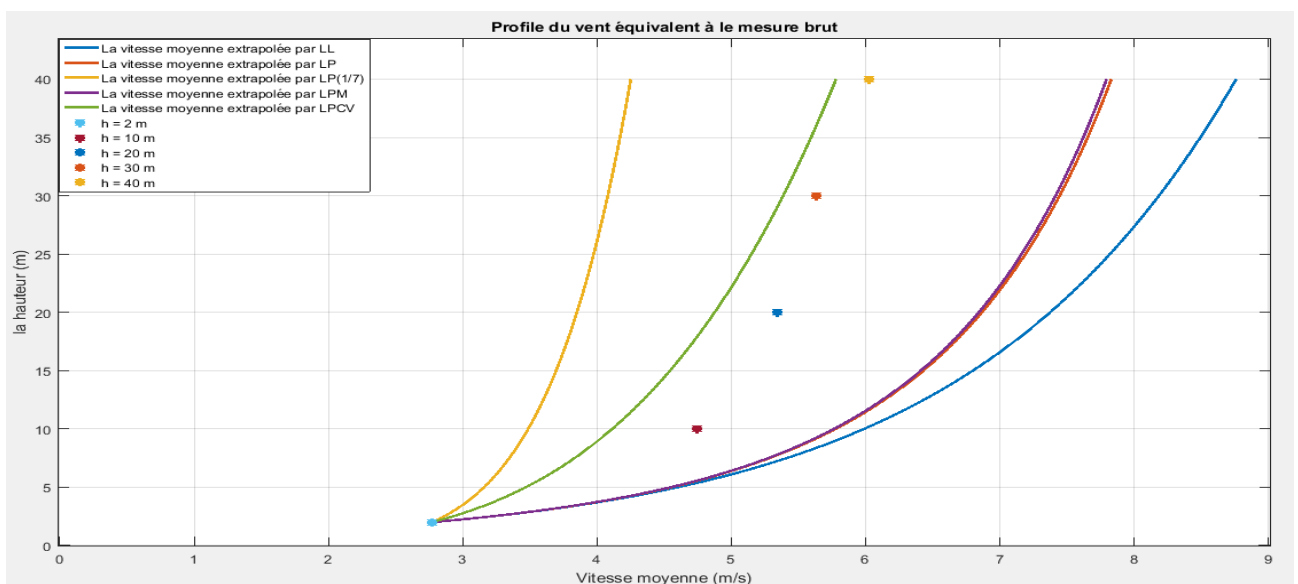


Figure 4.30 : Comparaison des profils du vent à partir l'extrapolation de la vitesse moyenne que z varie de 2 à 40 m par différent modèles à court terme.

A partir de la figure 4.30 est présente la comparaison entre les modèles à court terme d'extrapolation des vitesses moyennes de $h=2$ vers $h=40$ m, les vitesses moyennes brutes de chaque hauteur. On voit que la loi de puissance à coefficient variables est le modèle plus adéquat. C'est le seul modèle dont valeur sont bien très proche des valeurs obtenue à partir les mesures brutes. Pour les autres modèles on remarque alors que deux modèles sont confondus (la loi de puissance plus la loi de puissance modifiée), et la loi logarithmique présente un tracé qui diverge de celui des valeurs de mesures brutes.

4.5.2. Les profile du vent à partir les modèles à long terme

En figure 4.31 sont affichées les tracés des profils du vent pour le cas à long terme.

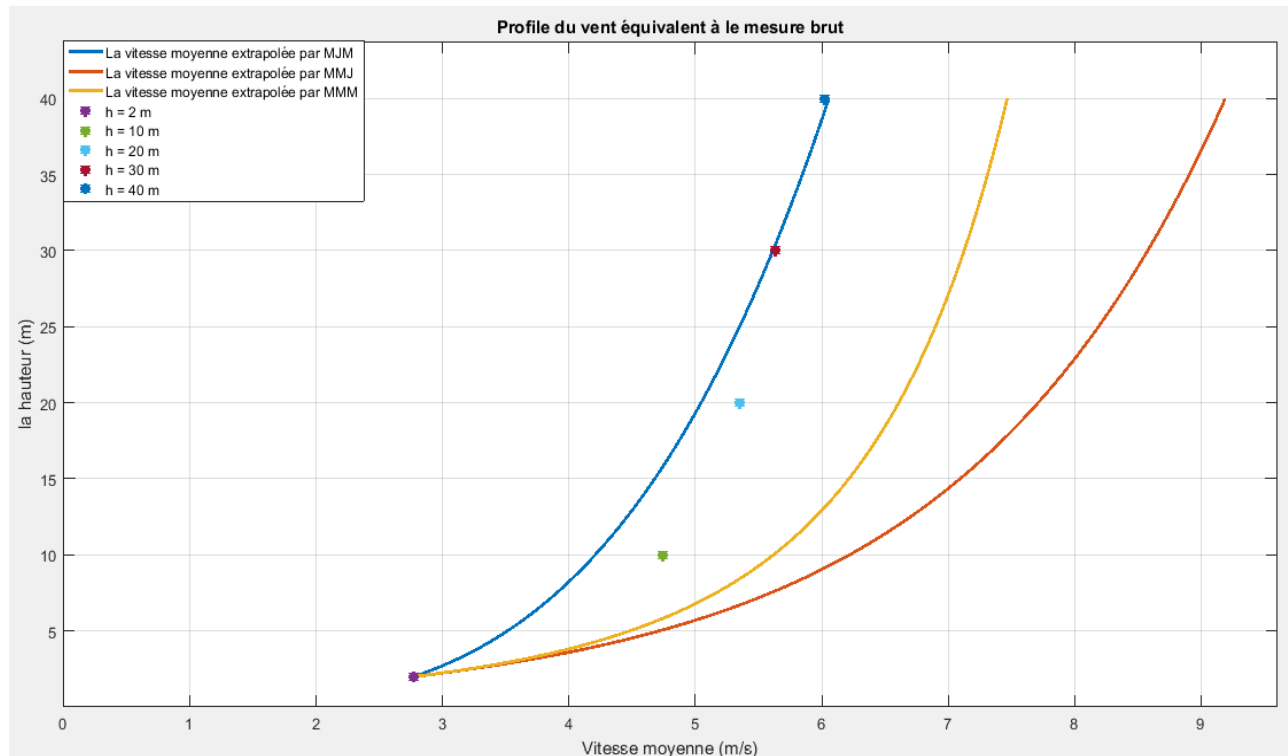


Figure 4.31 : Comparaison des profils du vent à partir l'extrapolation de la vitesse moyenne que z varie de 2 à 40 m par différent modèles à long terme.

La figure 4.31 détermine que le modèle de Justus et Mikhaïl est bien le modèle le plus adéquat parmi les modèles d'extrapolation à long terme parce que la tracé rejoint les point des valeurs de la vitesse moyenne à partir de 30 m.

Mais pour les autres modèles, le modèle modifiée de Mikhaïl est plus proche que le modèle modifiée de Justus.

4.6. l'utilisation de nos résultats

4.6.1. Profil du vent

En figure 4.32 est tracé le profil vertical selon le modèle de l'extrapolation jusqu'à 60m. Que le tracé affichée le résultat de l'extrapolation verticale de la vitesse moyenne par le modèle choisie pour l'application et le calculs de potentielle éolienne à une hauteur égale à 60 m.

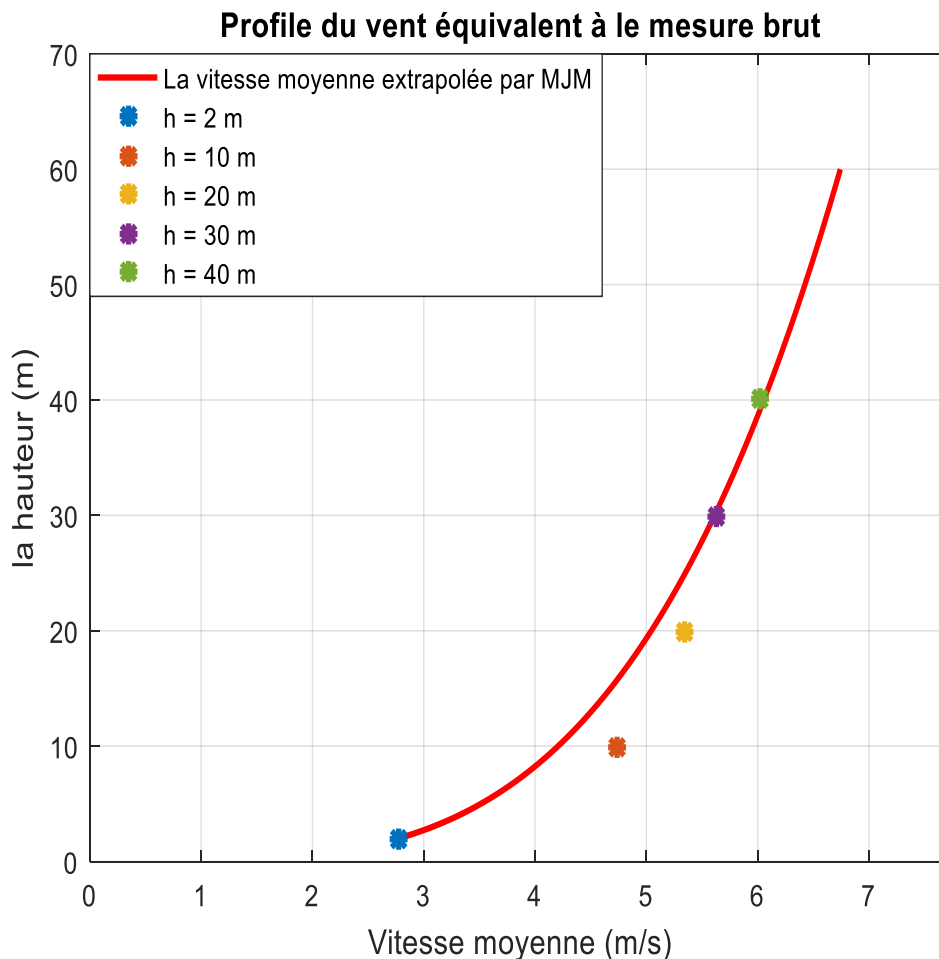


Figure 4.32 : Le profil verticale du vent à partir l'extrapolation verticale de la vitesse moyenne que z varie de 10 à 40 m par le modèle adéquat Justus et Mikhaïl.

Cette tracé définit la courbe de la vitesse moyenne extrapolée de $h=2$ à 60 m avec par le modèle adéquat dans la région, c'est le modèle de Justus et Mikhaïl. Ces résultats seront utilisé pour les calculs de la puissance électrique délivrée par une éolienne placée sur un mat de 60 m de hauteur et dont le rotor à 80 m de diamètre.

Les valeurs des paramètres de weibull à la hauteur 60 m, sont 7.60 m/s pour le C et 1.99 pour le k .

La valeur moyenne de la vitesse est arrivée à 6.74 m/s sur une hauteur de 60 m, cette valeur a été calculée par le modèle de Justus et Mikhaïl celui est adéquat a partir notre étude, donc on peut calculer la densité de puissance du vent, la puissance récupérables par le rotor d l'éolienne, et l'énergie électrique à la sorte de générateur éolienne. Et pour la valeur de la densité de puissance a atteint de 352.98 W/m².

4.6.2. La puissance énergétique éolienne

En tableau 4.19 sont affichés les résultats de potentielle énergétique éolienne dans la région de notre étude par l'extrapolation de la vitesse moyenne vers la hauteur d'un rotor de 60 m.

Tableau 4.19 : Paramètres du site à la hauteur de 60 m

Paramètres	valeur	unité
K	1,99	//
C	7,60	m/s
V_{moy}	6,74	m/s
$P_{\text{densité}}$	352,98	W/m ²
$P_{\text{Disponibles}}$	15,51	GW/année
P_{Betz}	9,15	GW/année
$E_{\text{électrique}}$	3,87	GWh/année

Dans le tableau 4.19 des résultats sont très importantes comme sont représenté les bons chiffres pour une application éolienne dans ce point de mesures. Dans les calculs on y posée que le rendement total de l'éolienne pour une production électrique est 25 %.

4.7. Conclusion

Après la simulation de programme sur MatLab et la discussion des résultats on conclut dans ce chapitre que deux modèles sont adéquat l'un c'est la loi de puissance à coefficient variable et l'autre c'est le modèle de Justus et Mikhaïl selon le cas d'extrapolation à court ou long terme. En plus que le modèle de Justus et Mikhaïl donne le meilleur résultat pour la région de Ksar El Chellala. Les résultats obtenus directement par le tracé de profil du vent et les valeurs de la comparaison des vitesses moyennes avec les mesures brutes.



Conclusion Générale



Le présent travail porte sur l'étude et l'analyse du profil verticale des paramètres du vent.

Un état de l'art a été établi et a permis d'identifier les différentes formules d'extrapolation à court et à long terme.

Un programme sous MatLab a été développé pour calcules les différentes valeurs des paramètres de weibull à court et à long terme les différentes tracés des distributions ont été trace et compares avec ceux obtenus à l'aide des traitements des données brutes.

Pour cela les données tri horaires mesurées sur le site de Ksar El Chellala à l'aide d'un pylône de mesures a 2, 10, 20, 30 et 40 m de hauteur.

Les résultats ont déduit que la loi à coefficient variable était la plus adaptée pour le court terme.

Et que la loi de Justus et Mikhaïl était celle qui donnait les meilleurs résultats pour le long terme. Ceci ayant été déduit grâce au calcul des erreurs relatives.

En fin, il faut souligner que la loi à coefficient variable a été testé que pour une seule rugosité et qu'il y a lieu de la teste pour différentes valeurs de la rugosité pour confirmer son adaptation concernant la loi à long terme celle de Justus et Mikhaïl.

Cette dernière présente de bon résultats mais nécessite les valeurs de k et c à altitude de 10 m du site considéré ce qui n'est pas toujours disponible.



Référence bibliographique



- [1] Y. A. Bertrand, "Les éoliennes", Membre de la section de Photographie, Rapport du groupe de travail De l'Académie des Beaux-Arts, Institut de France Académie des Beaux-Arts 23, quai de Conti – 75270 Paris cedex 06, 2007.
- [2] N. Kasbadji Merzouk, "Quelles perspectives pour les énergies renouvelables et le dessalement", 2^{ème} journées pédagogiques sur les énergies renouvelables, Département des énergies renouvelables, Université de Blida. 2016.
- [3] Nachida Kasbadji Merzouk, "Evaluation du gisement énergétique éolien contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie", Thèse de Doctorat, L'université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, Faculté des Science, Département de Physique, Unité de recherche matériaux et énergies renouvelable, 2006.
- [4] A. S. Monin and A. M. Obukov, «Basic Regularity in Turbulent Mixing Surfaces Layer of the Atmosphere" Akad. Nauk. S.S.S.R., Trud Geof. Inst. vol. 24, 151, (1954).
- [5] J. A. Businger, «On the structure of the atmospheric surfaces layer" Journal of Meteorology, vol. 12, pp. 353-361, (1955).
- [6] Nobutaka Menji and Joost A. Businger, "Stability Dependence of Temperature, Humidity and Vertical Wind Velocity Variances in the Atmospheric Surface Layer", Journal of the Meteorological society of Japan, 1971
- [7] C. G. Justus and A. Mikhail, «Height Variation of Wind speed and Wind distributions Statistics" Geophysical Research Letters, vol. 3, N°5, (1976).
- [8] A. Tenneeks, "The Logarithmic Wind Profile" Journal of Atmospheric Sciences, vol. 30, pp. 234-238, (1973).
- [9] A. S. Mikhail, and C. G. Justus, "Comparison of Height Extrapolation Models and Sensitivity Analysis" Wind Engineering, vol. 5, N°2, (1981).
- [10] H. Nfaoui, J. Bahraoui Buret, and A. A. M. Sayigh, "Wind Characteristics and Wind Energy Potential in Morocco" Solar Energy, vol. 1, pp. 51-60, (1998).
- [11] F. F. Knidiri, A. Laouina, M. Fabre, et A. Wyatt, "L'énergie éolienne au Maroc" Rapport Interne au CDER, Algérie, (1986).
- [12] S. Poje and B. Cividini, «Assessment of Wind Energy Potential in Croatia" Solar Energy, vol. 41, N°6, pp. 543-554, (1988).
- [13] A. S. Mikhail, "Height Extrapolation of Wind Data" Transaction of ASME, vol. 107, pp. 10-14, (1985).
- [14] N. Kasbadji Merzouk, M. Merzouk, N. Messen et B. Benyoucef, Profil vertical de la vitesse du vent en milieu semi-aride test des modèles d'extrapolation, international congress on photovoltaic and wind energies, tlemcen 2003.
- [15] Bernhard Lange, Søren E. Larsen, Jørgen Højstrup, Rebecca Barthelmie, "the wind speed profile at offshore wind farm sites", Preprint, Dewek 2002, Wilhelmshaven.
- [16] G. P. Van Den Berg, "Effects of the wind profile at night on wind turbine sound", Journal of Sound and Vibration, 2003.

- [17] I.A. Pérez, M.A. Garcia, M.L. Sanchez, B. de Torre, “Analysis and parameterization of wind profiles in the low atmosphere”, *Solar Energy* 78 (2005) 809–821.
- [18] N. Kasbadji-Merzouk, M. Merzouk et B. Benyoucef, ”Extrapolation verticale des paramètres de Weibull pour l’estimation du potentiel récupérable”, *Revue des Energies Renouvelables ICRES-07 Tlemcen* (2007) 193 – 198.
- [19] Rob Istchenko and Barry Turner, “Extrapolation of Wind Profiles Using Indirect Measures of Stability”, *Wind Engineering*, VOLUME 32, NO. 5, 2008.
- [20] M C Holtslag, W. A. A. M. Bierbooms and G. J. W. Van Bussel, “Estimating atmospheric stability from observation and correcting wind shear models accordingly”, *The Science of Making Torque from Wind* 2012.
- [21] Oluseyi O Ajayi, Richard O Fagbenle, James Katende, Samson A Aasa and Joshua O Okeniyi, “Wind profile characteristics and turbine performance analysis in Kano, north-western Nigeria”, Ajayi et al. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 2013.
- [22] E. Päsche, R. Leinweber, and V. Lehmann, “An assessment of the performance of a 1.5µm Doppler lidar for operational vertical wind profiling based on a 1-year trial”, *Atmos. Meas. Tech.*, 8, 2251–2266, 2015.
- [23] Nawal Cheggaga, “Abderrahmane Hamidat, Omar Nadjemi, Génération de Profils de Vent en vue d’Application Eoliennes”, Vol.3-pp.97-102, Copyright - IPCO 2015.
- [24] N. Kasbadji Merzouk, "Cartes des Vents de l'Algérie, Résultats Préliminaires" *Revue des Energies Renouvelables : Valorisation*, pp. 209-214, (1999).
- [25] R. Maouedj a,*, S. Bousalem b, Y. Hadji a, & B. Benyoucef b, *Wind Energy Resource Assessment For Algeria*, *Communication Science communication & technologie* N° 8. Janvier 2010.
- [26] S.M. Boudia, A. Benmansour, N. Ghellai, M. Benmdjahed and M.A. Tabet Hellal, *Temporal Assessment Of Wind Energy Resource In Algerian Highlands Regions*, *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 15 N°1 (2012) 43 – 55.
- [27] Seyit A. Akdag ET Ali Diler, *A New Method to Estimate Weibull Parameters for Wind Energy Applications*, *Energy Conversion and Management* 50 (2009) 1761–1766.
- [28] Matthew A. Lackner, Anthony L. Rogers, James F. Manwell, Jon G. McGowan, *A New Method For Improved Hub Height Mean Wind Speed Estimates Using Short-Term Hub Height Data*, *Renewable Energy* 35 (2010) 2340e2347.
- [29] M. Elamouri, F. Ben Amar, A. Trabelsi, *Vertical Characterization Of The Wind Mode And Its Effect On The Wind Farm Profitability Of Sidi Daoud – Tunisia*, *Energy Conversion and Management* 52 (2011) 1539–1549.
- [30] Giovanni Gualtieri, Sauro Secci, “Methods To Extrapolate Wind Resource To The Turbine Hub Height Based On Power Law: A 1-H Wind Speed Vs Weibull Distribution Extrapolation Comparison”, *Renewable Energy* 43 (2012) 183e200.

- [31] Paulo Alexandre Costa Rocha, Ricardo Coelho de Sousa, Carla Freitas de Andrade, Maria Eugênia Vieira da Silva, "Comparison of Seven Numerical Methods for Determining Weibull Parameters for Wind Energy Generation in the Northeast Region of Brazil", *Applied Energy* 89 (2012) 395–400.
- [32] Zekai Sen, Abdusselam Altunkaynak, and Tarkan Erdik, "Wind Velocity Vertical Extrapolation by Extended Power Law", *Advances in Meteorology Volume 2012*, Article ID 178623, 6 pages.
- [33] M. Kazet, R. Mouangue, A. Kuitche, J.M. Ndjaka et S. Takam, "Modélisation Et Simulation Numérique Des Données Du Vent En Vue D'une Prédiction De L'énergie Electrique D'origine Eolienne: Cas D'un Site De La Ville De N'Gaoundéré Au Cameroun", *Revue des Energies Renouvelables Vol. 16 N°3 (2013) 527 – 538*.
- [34] Jennifer F. Newman and Petra M. Klein, "The Impacts of Atmospheric Stability on the Accuracy of Wind Speed Extrapolation Methods", *Resources* 2014, 3, 81-105; doi: 10.3390/resources3010081.
- [35] Dalila Khalfa, 1Abdelouaheb Benretem, 2Lazher Herous and 1Issam Meghlaoui, "Evaluation of the Adequacy of the Wind Speed Extrapolation Laws For Two Different Roughness Meteorological Sites", *American Journal of Applied Sciences* 11 (4): 570-583, 2014.
- [36] Dr. Firas A. Hadi, "Diagnosis of the Best Method for Wind Speed Extrapolation", *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, Vol. 4, Issue 10, October 2015.
- [37] Emilio Gómez-Lázaro, María C. Bueso, Mathieu Kessler, Sergio Martín-Martínez, Jie Zhang, Bri-Mathias Hodge et Angel Molina-García, "Probability Density Function Characterization for Aggregated Large-Scale Wind Power Based on Weibull Mixtures", *Energies*, MDPI, 2 February 2016
- [38] M. Rapin, J. M. Noel, "Energie Eolienne", Dunod, Paris, 2010, ISBN978-2-10-50801-3.
- [39] N. Kasbadji Merzouk et M. Merzouk, "Estimation du potentiel énergétique éolien utilisable Application au pompage dans les Hauts Plateaux", *Revue des Energies Renouvelables Vol. 9 N°3 (2006) 155 – 163*.
- [40] PANIC Ivanka, "Tests de modèles numériques de dispersion et de dépôt sec de polluants atmosphériques : définition de scénarios représentatifs", *Université de Marne la Vallée*, Avril – Septembre 2003.
- [41] Tuzet, A., Sanz, C., Zurfluh, O., Fouéré, A., 1995. "Les échanges convectifs au sein du couvert", *Actes Ecole-Chercheurs INRA en Bioclimatologie, Tome 1*. + Brunet, Y., Pradel, E., Camenen, L., 1995. « Introduction aux transferts turbulents », *Actes Ecole-Chercheurs INRA en Bioclimatologie, Tome 1*.
- [42] C. A. PAULSON, "the Mathematical Representation of Wind Speed and Temperature Profiles In the Unstable Atmospheric Surface Layer", *Journal of Applied Meteorology*, (1970).
- [43] Redjem Radia « Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne » Mémoire de magistère en Electrotechnique, université de Mentouri de Constantine, 2009.

[44] Benali Oussama, "Evaluation de potentiel énergétique éolien dans la région sud-est du Sahara algérienne", Mémoire de MASTER ACADEMIQUE, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, Soutenu publiquement le : 08 / 06 / 2015.

[45] Latreche Mohammed, "Tahar Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien", Mémoire de Magister Université Ferhat Abbas de Setif, 2012.

[46] Ksar Chellala, https://fr.wikipedia.org/wiki/Ksar_Chellala .

[47] Nachida Kasbadji Merzouk, M. Merzouk and D. Abdeslam, "Prospects for the wind farm installations in the Algerian high plateaus", Conference on the promotion of Distributed Renewable Energy Sources in the Mediterranean region, Nicosia, Cyprus, December 11th – 12th, 2009.

[48] Modifiée à partir, Janie Coulombe, "Évaluation de la modélisation et des prévisions de la vitesse du vent menant à l'estimation de la production d'énergie annuelle d'une turbine éolienne", Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures en vue de l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.) en statistique, avril 2015.

[49] Benali Oussama «Evaluation de potentiel énergétique éolien dans la région sud-est du Sahara algérienne». Mémoire de Master Académique, Université Kasdi Merbah Ouargla, Soutenu publiquement le : 08 / 06 / 2015.

[50] Catalogue Vestas V80-2MW, Vestas Wind Systems A/S, Alsvej 21. 8940 Randers SV. Denmark, Tel: +45 9730 0000. Fax: +45 9730 0001, vestas@vestas.com. <http://pdf.directindustry.com/> .