

RESEARCH ARTICLE

**Systeme eolien a flux accelere :
modelisation et experimentation**

AUTHORS

Mohamed MOUMOUNI GUERO



HAL
open science

MODÉLISATION THÉORIQUE ET EXPÉRIMENTATION D'UN SYSTEME ÉOLIEN À ACCÉLÉRATEUR DE FLUX DE VENT

Mohamed MOUMOUNI GUERO

► To cite this version:

Mohamed MOUMOUNI GUERO. MODÉLISATION THÉORIQUE ET EXPÉRIMENTATION D'UN SYSTEME ÉOLIEN À ACCÉLÉRATEUR DE FLUX DE VENT. Génie mécanique [physics.class-ph]. universite d'abomey calavi, 2023. Français. NNT: . tel-04029404

HAL Id: tel-04029404

<https://hal.science/tel-04029404>

Submitted on 27 Mar 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Université d'Abomey-Calavi (UAC)

N° d'Ordre : 120



École Doctorale des Sciences de l'Ingénieur (ED-SDI)

Thèse de Doctorat

Présentée pour l'obtention du grade de

Docteur de l'Université d'Abomey-Calavi

Spécialité : Efficacité énergétique et énergies renouvelables

MODÉLISATION THÉORIQUE ET EXPÉRIMENTATION D'UN SYSTEME ÉOLIEN À ACCÉLÉRATEUR DE FLUX DE VENT

Présentée par :

MOUMOUNI GUERO Mohamed

Master en Conception et Étude de Fiabilité de Systèmes Mécaniques

Soutenue publiquement le 06 Janvier 2023

Devant le jury composé de :

Président :	- Mr GIBIGAYE Mohamed,	Professeur titulaire	Université d'Abomey-Calavi (Bénin)
Rapporteurs :	- Mr Moussa Y. SORO,	Maître de Conférences	Institut International d'ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE Burkina Faso)
	- Mme Haoua AMADOU,	Professeure titulaire	Université Abdou Moumouni de Niamey (Niger)
	- Mr Aristide HOUNGAN,	Professeur titulaire	Université Nationale des Sciences, Technologies, Ingénierie et Mathématiques (Bénin)
Examineurs :	- Mr Latif FAGBEMI,	Professeur Titulaire	Université d'Abomey-Calavi (Bénin)
	- Mr Macaire AGBOMAHENA,	Maître de Conférences	Université d'Abomey-Calavi (Bénin)
Directeur de thèse :	- Mr PRODJINONTO Vincent,	Maître de Conférences	Université d'Abomey-Calavi (Bénin)

Table des matières

Table des matières	i
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	vii
Sigles et abréviations	viii
Table des notations	ix
Remerciements	xiii
Dédicaces	xiv
RÉSUMÉ	xv
ABSTRACT	xvi
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1. Mise en situation	1
2. Problématique	2
3. Objectifs de la recherche	2
4. Portée des travaux	3
5. Organisation et structure de la thèse	3
CHAPITRE 1 : ÉTAT DE L'ART DES DISPOSITIFS ÉOLIENS CLASSIQUES ET CARACTÉRISATION DE SITE ÉOLIEN	5
1. Introduction	5
2. Historique de l'éolien	5
3. Définitions relatives à l'énergie éolienne	8
3.1. Constitution d'un système éolien	8
3.2. Différents types d'aérogénérateurs	9
3.2.1. Classification selon l'orientation de l'axe de rotation	9
a. Éolienne à axe horizontal	9
b. Éolienne à axe vertical	10
3.2.2. Classification selon la vitesse : fixe ou variable	14
a. Éolienne à vitesse fixe	14

b. Éolienne à vitesse variable	14
4. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	15
4.1. Avantages	15
4.2. Inconvénients	16
5. État de l'art des dispositifs éoliens, de leur optimisation et leur défauts structurels	17
6. Méthodes de caractérisation du potentiel éolien	19
6.1. Modèles d'analyse des vents	19
6.1.1. Distribution de Weibull	20
6.1.2. Distribution hybride de Weibull	22
6.1.3. Distribution de Rayleigh	22
6.2. Méthodes d'ajustement des paramètres de Weibull	22
6.2.1. Calcul par l'écart-type et la vitesse moyenne	22
6.2.2. Calcul par la méthode des moindres carrés	23
6.2.3. Méthode du Facteur d'Énergie EPF	23
6.2.4. Méthode de Mabchour	24
6.3. Extrapolation verticale de la vitesse du vent	24
6.3.1 Loi de puissance Justus-Mikhaïl	25
6.3.2 Loi de puissance à coefficient variable	25
6.4. Extrapolation verticale des paramètres de Weibull	25
6.5. Définition des paramètres du vent	26
6.5.1 Vitesse moyenne et vitesse cubique moyenne	26
6.5.2 La variance de la distribution des vitesses	27
6.5.3 Facteur de puissance et indice de variation du vent	27
6.5.4. La rose des vents	28
6.6. Caractérisation du potentiel énergétique éolien	28
6.6.1. Densité de puissance moyenne du vent	29
6.6.2. Puissance théorique maximale récupérable (Limite de Betz)	29
6.6.3. Puissance éolienne moyenne utile	30

6.6.4. Densité énergétique moyenne disponible	30
7. Mise en œuvre des paramètres définis pour caractériser un site : Cas de la région de N'Guigmi.....	31
7.1. Caractéristiques du vent à 10 mètres du sol	31
7.1.1. Variation à l'échelle annuelle et interannuelle	31
7.1.2. Variation saisonnière de la vitesse moyenne du vent	33
7.1.3. Étude de la direction du vent (rose des vents).....	34
7.1.4. Modélisation de la vitesse du vent	35
7.1.4.1. Distribution statistique de la vitesse du vent.....	35
7.1.4.2. Ajustement par la fonction de Weibull	38
7.1.5. Densité de puissance moyenne et d'énergie moyenne annuelle.....	40
7.2. Résultats d'extrapolation verticale de la vitesse moyenne du vent et des paramètres de Weibull à la hauteur du mât	41
7.3. Analyse de corrélation entre les différents paramètres météorologiques.....	42
7.4. Application de la méthode	45
8. Conclusion	49
CHAPITRE 2 : LES BASES SCIENTIFIQUES POUR LE CHOIX DU CONVERGENT	51
1. Introduction.....	51
2. Concepts et définitions	51
3. Généralités sur la thermodynamique	53
3.1. Premier principe de la thermodynamique ou principe de conservation de l'énergie	53
3.2. Second principe de la thermodynamique ou principe d'évolution	53
3.3. Théorie des gaz idéaux	54
4. Écoulements compressibles de fluides compressibles	55
4.1. Célérité du son et nombre de Mach	56
4.2. Écoulements isentropiques unidirectionnels de gaz parfaits	57
4.3. Quelques résultats utiles	58
4.4. Écoulement isentropique avec variation de section	61

4.5. Génération d'onde de choc	64
4.6. Conception et modélisation	65
4.7. Analyse numérique de l'accélérateur de flux de vent	66
5. Dispositif éolien à convergent de flux de vent	69
5.1. Présentation du schéma du dispositif.....	69
5.2. Fonctionnement du dispositif avec ventilateur	69
5.2.1. Couple et Vitesse angulaire sur l'axe du générateur	71
5.2.2. Effet du rapport de transmission des poulies sur les valeurs mécaniques du générateur	71
5.2.3. Commentaire des courbes.....	74
5.2.4. Nombre de pâles et ventilateurs	76
5.2.5. Le choix du ventilateur	78
5.2.6. Exemple de choix de ventilateur.....	80
5.3. Fonctionnement du dispositif avec l'air ambiant.....	80
5.4. Gain en énergie du dispositif.....	84
5.5. Pourquoi un disque d'une certaine masse dans le dispositif ?	84
a) Moment d'inertie du système libre	85
b) Énergie cinétique	85
c) Puissance absorbée par le système.....	85
6. Conclusion	87
CHAPITRE 3 : CONCEPTION DU MODÈLE ET RÉALISATION DU PROTOTYPE	89
1. Introduction.....	89
2. Schéma cinématique du modèle	89
3. Calcul des différents éléments	90
3.1. Calcul de l'axe du disque	90
3.1.1. Dimensionnement statique.....	91
3.1.2. Calcul des contraintes.....	91
3.2. Calcul du système de transmission retenu	93
3.3. Calcul des roulements.....	95

3.3.1. Critères de choix	95
3.3.2. Montage	96
3.3.3. Dimensionnement	97
4. Montage final du dispositif	98
4.1. Modèle mécanique d'ensemble	98
4.2. Bilan énergétique du dispositif éolien	99
5. Fabrication du prototype	100
6. Analyse économique du dispositif	102
7. Analyse des impacts du projet sur l'environnement.....	105
7.1. Milieu physique.....	106
7.1.1. Émissions carbonées et qualité de l'air	106
7.1.2. Émissions des polluants dans l'atmosphère	106
7.2. Milieu humain et naturel.....	107
8. Conclusion	107
CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES	109
1. Synthèse des travaux	109
2. Application au nouveau dispositif éolien.....	110
3. Calcul du dispositif et sa réalisation	111
4. Les limites du modèle	111
5. Perspectives.....	111
RÉFÉRENCES	112
ANNEXES.....	Erreur ! Signet non défini.
ANNEXE 1 : Analyse des paramètres météorologiques : ACP Région d'Agadez	120
Annexe 2 : Le dispositif à convergent de flux : impact du gaz de service	123
ANNEXE 3 : Tables des écoulements compressibles $\gamma=1.405$	127
ANNEXE 4 : Elements de calcul et de choix des courroies	129
ANNEXE 5 : Dessin de définition des pièces et dessin d'ensemble	131
Annexe 6 : Tableau qui recense quelques sources d'énergie et présente leurs avantages et inconvénients.....	150

Liste des figures

Figure 1 1: Aperçu des principales étapes franchies par l'industrie éolienne depuis 1982 [6].....	7
Figure 1.2: Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	8
Figure 1. 3: Les éoliennes à axe horizontal [11].....	9
Figure 1. 4: Éoliennes amont et aval [12].	10
Figure 1. 5: Quelques représentations simplifiées d'éoliennes à axe vertical	11
Figure 1. 6: Éoliennes de type Darrieus [13].....	12
Figure 1. 7: Éolienne type Savonius conventionnel et Savonius hélicoïdal [13]	13
Figure 1. 8: Représentation schématique des déprédations successives de l'énergie éolienne avant l'utilisation [58]....	28
Figure 1. 9: Variation de la vitesse moyenne sur la période 2010 - 2019	33
Figure 1. 10: Rose des vents sur la période d'observation (2010 - 2019)	35
Figure 1. 11: Histogramme des classes des vitesses de vent pour l'année 2010	37
Figure 1. 12: Histogramme des classes des vitesses de vent pour l'année 2017	38
Figure 1. 13: Courbe de Weibull pour l'année 2010.....	39
Figure 1.14: Courbe de Weibull pour l'année 2017.....	40
Figure 1. 15: Variation interannuelle de l'humidité relative	43
Figure 1 16: Variation interannuelle de la température.....	43
Figure 1.17: Variation interannuelle de l'insolation	44
Figure 1. 18: Variation interannuelle de la pression.....	44
Figure 1. 19: Variation interannuelle de la vitesse de vent	44
Figure 1. 20: Espace des variables des plans factoriels F1-F2	47
 Figure 3. 1: Schéma cinématique avec les différentes classes d'équivalence.....	 90
Figure 3. 2: Schéma des forces agissant sur l'axe.....	91
Figure 3. 3: Roulement à une rangée de billes SKF 6004 [41,43]	97
Figure 3. 4: Dessin d'ensemble du dispositif de simulation	98
Figure 3. 5: Dessin d'ensemble du dispositif pour exposition ambiante.....	99
Figure 3.6: Paramètres pour réalisation du convergent.....	101

Liste des tableaux

Tableau 1. 1: Résumé des avantages et inconvénients des deux dispositifs.....	14
Tableau 1. 2: Résumé des avantages et inconvénients des éoliennes a vitesse fixe et a vitesse variable	15
Tableau 1. 3: Expressions des modèles d'analyse des vents [57].	26
Tableau 1.4: expressions de l'écart-type des variations des vitesses suivant les trois modèles d'analyse des vents [57].	27
Tableau 1.5: Moyennes annuelles, écart-type et coefficients des variations interannuelles de la vitesse moyenne du vent à 10 mètres du sol.....	32
Tableau 1. 6: Fréquences absolues et cumulées pour les vents observés en 2010	36
Tableau 1.7: Fréquences absolues et cumulées pour les vents observés en 2017	36
Tableau 1. 8: Valeurs des paramètres de Weibull annuels.....	38
Tableau 1. 9: Estimation de la vitesse moyenne du vent, de la densité de puissance moyenne disponible et d'énergie moyenne.	41
Tableau 1 .10: Extrapolation verticale de la vitesse moyenne annuelle du vent et des paramètres de Weibull à 30 m et 50 m d'altitude.	42
Tableau 1.11: Moyennes mensuelles des paramètres métrologiques utilisés dans l'étude....	43
Tableau 1.12: Matrice de corrélation (Pearson) entre les variables analysées	46
Tableau 1.13: les valeurs propres des axes principaux.	46
Tableau 1.14: Corrélations entre les variables et les facteurs	47
Tableau 2.1: Paramètres géométriques du convergent de flux de vent	65
Tableau 2.2: Valeurs de référence de simulation	66
Tableau 2.4: Rayon de courbure et coefficient de perte de charge pour différentes valeurs de α	83
Tableau 3.1:Types de roulements et caractéristiques	96
Tableau 4. 1: Devis quantitatif et estimatif pour la réalisation du prototype	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 4. 2: Prix de quelques modèles industriels d'éoliennes	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 4. 3: Rejet de polluants dans l'atmosphère selon différentes sources d'énergie en phase d'exploitation [85].....	Erreur ! Signet non défini.

Sigles et abréviations

ACP	: Analyse en composantes principales
AFNOR	: Association Française de Normalisation
DNM	: Direction nationale de la météorologie
EAH	: Éolienne à axe horizontal
EAV	: Éolienne à axe vertical
EWEA	: European Wind Energy Association
GW	: Gigawatt
GWEC	: Global Wind Energy Council
J-C	: Jesus Christ
NF-X 60 000	: Norme en vigueur pour la maintenance industrielle.
TGV	: Train à grande vitesse
WWEA	: World Wind Energy Association

Table des notations

Symboles	Désignations	Unités
λ	Vitesse spécifique de la turbine	$m. s^{-1}$
c	Paramètre d'échelle de Weibull	$m. s^{-1}$
k	Paramètre de forme de Weibull	
$f(U)$	Fonction de densité de probabilité	
$F(U)$	Distribution de Weibull	
U	Vitesse de vent	$m. s^{-1}$
U_m	Vitesse moyenne de vent	$m. s^{-1}$
$\bar{U}$	Vitesse moyenne pondérée	$m. s^{-1}$
$\overline{U^3}$	Vitesse cubique moyenne	
Γ	Fonction gamma	
$f_{hw}(U)$	Distribution hybride de Weibull	
F_0	Fréquence des vents calmes	
$f_R(U)$	Distribution de Rayleigh	
σ	Écart-type	$m. s^{-1}$
E_{pf}	Énergie de facteur	
$Z_0, Z_1, Z_2, \dots,$	Altitude de mesure de vent	m
α	Coefficient de friction	
$Var(U)$	Variance de la distribution des vitesses	
R_p	Facteur de puissance du vent	
I_v	Indice de variation de la vitesse	
$P(U)$	Puissance du vent	$Watt$
ρ	Masse volumique	$kg. m^{-3}$
$\bar{P}$	Densité de puissance par unité de surface	$W. m^{-2}$
$P_{récupérable}$	Puissance à la sortie du rotor	$Watt$
S	Aire balayée par les pales de l'éolienne	m^2
$\overline{P_{Utile}}$	Puissance produite par l'éolienne	$Watt$
$\bar{E}$	Densité de l'énergie	$Wh. m^{-2}$
t	Temps	s
C_p	Coefficient de Betz	
$F1, F2, Fn \dots$	Facteurs principaux de l'ACP	

E_c	Énergie cinétique	Joule
E_p	Énergie potentielle	Joule
E_t	Énergie totale	Joule
$\dot{m}$	Débit massique	$kg.h^{-1}$
τ	Contrainte de cisaillement	$N.mm^2$
W	Travail	Joule
Q	Chaleur échangée	Joule
H	Enthalpie	Joule
ds	Variation d'entropie	$J.K^{-1}$
du	Variation d'énergie interne	Joule
P	Pression	Pa
T	Température	$^{\circ}K$
r	Constante du gaz considéré	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
R	Constante universelle des gaz parfaits	$J.mol^{-1}.K^{-1}$
c_p	Chaleur massique à pression constante	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
c_v	Chaleur massique à volume constant	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
γ	Coefficient polytropique	
a	Célérité du son	$m.s^{-1}$
M_a	Nombre de Mach	
g	Accélération de la pesanteur	$m.s^{-2}$
Paramètres avec indice 0	Paramètres à l'état générateur	
Paramètres avec l'exposant *	Paramètres au point critique	
A	Section du convergent	m^2
$\vec{V}$	Vitesse eulérienne d'une particule fluide	$m.s^{-1}$
P_t	Tenseur des contraintes (ou tenseur de pression)	$J.kg^{-1}$
E	Énergie totale par unité de masse	
Σ	Tenseur des contraintes visqueuses	Pa
$\vec{q}$	Flux de chaleur dû à la conduction thermique	$J.m^{-2}.s^{-1}$
$\vec{q}_R$	Flux de chaleur dû au rayonnement	$J.m^{-2}.s^{-1}$
$\mathcal{P}_{théo}$	Puissance théorique	Watt
C	Couple	$N.m$
$F_{théo}$	Force théorique	N
Ω_D	Vitesse angulaire du disque	$Rd.s^{-1}$

N_{GP}	Vitesse de rotation de la grande poulie	$trs.min^{-1}$
N_{ax}	Vitesse de rotation de la petite poulie	$trs.min^{-1}$
R_{GP}	Rayon grande poulie	mm
R_{PP}	Rayon petite poulie	mm
C_{ax}	Couple sur l'axe du générateur	$N.m$
P_{ax}	Puissance sur l'axe du générateur	$Watt$
N_f, C_f, P_f	Vitesse de rotation, couple et puissance de fonctionnement	
D_p	Diamètre d'une pôle	mm
R_D	Rayon du disque massif	mm
l_b	Longueur du bras en fer torr	mm
Q_v	Débit volumique	$m^3.s^{-1}$
P_{glob}	Puissance globale du dispositif	$Watt$
e_p	Épaisseur de tôle	mm
J_Δ	Moment d'inertie du disque	$kg.m^2$
M	Masse	Kg
J_1	Moment d'inertie du bras	$kg.m^2$
J_2	Moment d'inertie de la pale	
θ	Rotation angulaire du disque	$Rd.s^{-1}$
ω_m	Vitesse angulaire moyenne du disque	$Rd.s^{-1}$
ω_f	Vitesse angulaire faible du disque	$Rd.s^{-1}$
a_m	Amplitude des vitesses de rotation	$Rd.s^{-1}$
P_r	Puissance résiduelle	$Watt$
t_m	Temps moyen	S
	-	
σ_{pe}	Contrainte pratique à l'extension	MPa
R_e	Limite d'élasticité	MPa
K_s	Coefficient de sécurité	
F	Intensité de force de vent sur pale	N
$\vec{R}_A$ et $\vec{R}_B$	Réaction aux appuis	N
σ_{max}	Contrainte max de flexion	MPa
M_{fz}	Moment de flexion	$N.m$
I_{gz}	Moment d'inertie	mm^4
y_{max}	Fibre la plus éloignée de l'axe de rotation	mm
$\tau_{torsion}$	Contrainte de torsion	MPa

τ_{max}	Contrainte max de torsion	MPa
σ_{pg}	Résistance pratique au cisaillement	MPa
σ_g	Limite élastique en cisaillement	N.m
C_{pal}	Couple sur pale	Watt
P_n	Puissance nominale	Watt
P_c	Puissance de calcul	Watt
P_b	Puissance brute transmissible par courroie	$m. s^{-1}$
V_l	Vitesse linéaire courroie	
R_t	Rapport de transmission	mm
L_c'	Longueur théorique courroie	mm
L_c	Longueur de référence courroie	mm
e'	Entraxe souhaité	mm
e	Entraxe réel	
N_{th}	Nombre théorique courroie	tours
L	Durée de vie roulement	
K_r	Facteur de fiabilité roulement	tours
L_R	Durée de vie à la charge dynamique de base	N
F_e	Charge radiale sur roulement	
XPZ	Type courroie trapézoïdale	
η_c	Rendement courroie	
η_g	Rendement générateur	
η_R	Rendement roulement	
η_{global}	Rendement global dispositif	

Remerciements

Avant tout, je rends grâce à Allah, le tout puissant et miséricordieux, pour m'avoir donné la santé et la volonté de mener ces travaux de recherche à terme.

J'exprime toute ma reconnaissance et ma profonde gratitude à mon directeur de thèse, Monsieur PRODJINONTO Vincent, Maître de Conférences des Universités du CAMES. Vos orientations, écoute, disponibilité et votre compréhension ont été la clé de la réussite de cette thèse. Je ne vous remercierai jamais assez pour m'avoir ouvert la porte de votre équipe de recherche et surtout pour vos conseils avisés de tous les jours. Qu'Allah vous le reconnaisse.

Je tiens également à remercier avec respect, le Directeur de l'École Doctorale des Sciences De l'Ingénieur (ED-SDI), Pr. GIBIGAYE Mohamed, Professeur titulaire des Universités, pour la sympathie et la facilité des procédures administratives dans le cadre de la soutenance de ces travaux de recherche.

J'associe également à ces remerciements, tous les membres du jury, notamment le Professeur Aristide HOUNGAN, la Professeure Haoua AMADOU, le Professeur Latif FAGBEMI, le Dr (MC) Macaire AGBOMAHENA et le Dr (MC) Moussa Y. SORO, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'évaluer ce manuscrit.

Je n'oublie pas de remercier tous les acteurs de l'ED-SDI pour leurs sens de responsabilité et d'ouverture, le personnel administratif et technique de l'EPAC et tous les enseignants qui m'ont orienté et guidé pendant mes recherches.

Mes remerciements vont aussi à l'endroit de mes camarades de laboratoire. Pour tous ces moments de partage, d'entraide, de stimulation et de défis scientifiques en tout genre, je vous dis merci. Certains moments anodins sont devenus à travers nos échanges des vrais moments de découvertes scientifiques.

De façon formelle, j'adresse mes remerciements à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué d'une manière ou d'une autre à l'aboutissement heureux de ces travaux. Trouvez en cette thèse, l'expression de ma reconnaissance.

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

- Ma chère épouse et mes enfants ;

Je vous témoigne mes sentiments de reconnaissance, de gratitude pour tout le soutien que vous m'avez accordé et les sacrifices faits durant ces moments où j'étais absent.

- Mes parents, frère et sœurs ;

Pour le soutien indéfectible et l'encouragement que vous m'avez procuré.

- À toute la communauté scientifique du monde.

RÉSUMÉ

Ce travail de recherche a porté sur la modélisation théorique et l'expérimentation d'un accélérateur de flux de vent couplé à un dispositif de production d'énergie électrique. L'intrant indispensable à un système éolien est le vent. Un meilleur fonctionnement d'un tel système exige une bonne régularité et une vitesse donnée du vent qu'il n'est pas facile d'obtenir à basse altitude. Il faut donc élever les mâts parfois à des hauteurs improbables pour espérer une bonne qualité de vent et agrandir les surfaces balayées pour plus de puissance. On se retrouve à la fin avec un monstre de près de cent vingt mètres de haut avec des bras d'environ quarante-cinq mètres de long. Un tel système ne peut marcher qu'en entraînant avec lui, des problèmes d'encombrement, de vibrations, de stabilité, de couche limite, et en définitive, d'insécurité pour quelques mégawatts probables.

L'objectif principal visé dans cette étude est de proposer une alternative de production d'énergie abordable et viable. Pour ce faire, une analyse multivariée basée sur l'analyse en composantes principales est faite pour la région de N'Guigmi pour caractériser le comportement de vent. En conséquence, les plages de fonctionnement d'un dispositif éolien sont connues. Pour améliorer cette puissance théorique probable du site, les bases de conception d'un accélérateur de vitesse de vent sont posées et comme aboutissement, il est mis en œuvre un convergent de flux qui s'adapte parfaitement à un prototype éolien. L'effet de ce couplage a donné des résultats au-delà de nos espérances. Les vitesses à la sortie du convergent se trouvent être multipliées par 9 selon les simulations faites. Aussi, la puissance à la sortie du convergent est multipliée par le carré d'un coefficient supérieur à l'unité et qui dépend de la nature du gaz de service et du nombre de Mach. Le dispositif éolien, selon l'utilisation désirée, peut se comporter comme une machine à production d'énergie électrique ou un multiplicateur de puissance.

Pour joindre la théorie à la pratique, le prototype est conçu et réalisé. Il est apparu que pour une utilisation en environnement ambiant, la puissance produite est de $(3 - 2K)\mathcal{P}_{théo}$ avec l'utilisation de 3 convergents sur le dispositif, K étant le coefficient de perte de charge des convergents utilisés. Il est montré aussi que pour un gaz de coefficient polytropique plus faible, les puissances développées sont bien meilleures.

À la fin, une analyse économique du dispositif est faite en comparaison avec les dispositifs classiques. Il en résulte que notre dispositif est environ deux fois moins cher à puissance égale que le système éolien Windtronics BTPS 6500 le moins cher qui coûte environ 4 880 €.

Mots-clés : Multiplicateur de puissance ; couple et puissance ; convergent de flux ; dispositif éolien ; amélioration de performance

ABSTRACT

This research work focused on the design, manufacturing and implementation of a wind flow accelerator coupled to an electrical energy production device. The essential input to a wind energy system is the wind. A better functioning of such a system requires a good regularity and a given wind speed which is not easy to obtain at low altitude. It is therefore necessary to raise the pylons sometimes to improbable heights to hope for a good quality of wind and to enlarge the swept surfaces for more power. In fact, we end up with a monster of almost one hundred and twenty meters high with arms of about forty-five meters long. Such a system can only work by bringing with it problems of congestion, vibrations, boundary layer, and ultimately, insecurity for a few megawatts likely.

The main objective of this study is to propose an affordable and reliable alternative for energy production. To do so, a multivariate analysis based on principal component analysis is done for the N'Guigmi region to characterize the wind behavior. As a result, the operating ranges of a wind device are known. To improve this probable theoretical power of the site, the basis for the design of a wind speed accelerator is laid and as a result, a flow convergent is implemented that fits perfectly to a wind prototype. The effect of this coupling has given results beyond expectation. The speeds at the outlet of the convergent are multiplied by 9 according to the simulations made. Also, the power at the exit of the convergent is multiplied by the square of a coefficient strictly more than 1, which depend on the nature of gas and the Mach number. the flow remaining constant inside the convergent. The wind device, according to the desired use, can behave as an electrical energy production machine or a power multiplier.

To join the theory to the practice, the prototype is designed and manufactured. It appeared that for a use in ambient environment, the produced power is of $(3 - 2K)\mathcal{P}_{theo}$ with the use of 3 convergent on the device, K being the coefficient of loss of load of the used convergents. It is also shown that for a gas of lower polytropic coefficient, the developed powers are much better.

Finally, an economic assessment of the prototype is made, and it places the device in a much better position compared to its similar power competitors. The price of the prototype is half of the cheapest wind turbine in the market with the same power.

Keywords: Power multiplier; torque and power; convergent flow; wind device; performance improvement.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1. Mise en situation

L'accès à l'énergie est et demeure un enjeu majeur pour toute l'humanité. Dans les pays en développement, le nombre de personnes ne pouvant avoir accès à l'électricité est estimé à plus de 770 millions en 2020 [1]. Le pétrole, même si d'importants gisements sont et continuent d'être découverts dans ces pays, ne pourront cependant pas contribuer à l'amélioration des conditions des citoyens, à cause surtout du problème d'exploitation. La consommation excessive de la biomasse accentue la déforestation et pose de graves problèmes de santé publique. Cette ressource est mal exploitée (déforestation et abattage anarchique des arbres souvent) et les couches vulnérables de la société sont les plus touchées [2]. Le salut des pays en développement réside, dès lors, dans le développement des énergies renouvelables, faute de quoi, la population n'ayant pas accès à l'électricité, risque de s'accroître. La contribution du thermique nécessite l'installation de gigantesques champs solaires qui monopolisent de vastes terres inexploitées. Cette option est bénéfique pour les pays disposant de zones désertiques où l'installation des centrales solaires à concentration utilisant un cycle thermodynamique est envisagée. Cependant, la gestion des fins de vie de ces équipements peut s'avérer très onéreuse. Le photovoltaïque rentre dans ce registre.

Les barrages hydroélectriques ne sont pas partout disponibles, et leur installation est souvent source de conflits entre les communautés. Le plus dur, ce sont des problèmes écologiques sérieux qu'il faut résoudre (retenue d'eau, modification des lits du cours d'eau concerné...). Il va falloir faire le difficile choix entre obtenir de l'électricité et la perte d'importantes faunes et flores.

L'éolienne reste un parent pauvre parmi les énergies renouvelables développées. Les raisons sont nombreuses. D'une part, il y a l'incertitude d'une continuité et d'une régularité du vent. Cela fait que, le choix d'un site d'installation d'une éolienne nécessite un soin particulier. D'autre part, il faut envisager des hauteurs et des longueurs de pales impressionnantes. Ensuite, il faut parfois disposer de vastes champs à proximité d'habitations ce qui génère beaucoup d'inconfort. Le gros problème à l'origine du sous-développement de cette source d'énergie réside dans l'imprévisibilité du vent [3]. Il ne faut pas occulter le problème d'extension du réseau qui nécessite un investissement massif. Faut-il centraliser la production d'énergie éolienne ? Faut-il la décentraliser ? Et pour quelle densité de population faut-il adopter cette option pour garantir une meilleure rentabilité des investissements ?

En Afrique et particulièrement au Bénin comme au Niger, l'évaluation du potentiel du vent reste très limitée, en raison d'une couverture insuffisante du territoire en stations synoptiques. Cette situation freine l'évolution de la filière et reste un défi à relever pour son développement rapide.

2. Problématique

En écho à des situations internationales et locales fréquentes aujourd'hui, ce travail aborde principalement les incertitudes suivantes :

- La couverture en énergie électrique dans le pays est insuffisante pour satisfaire une demande de plus en plus croissante des ménages et d'une industrialisation émergente.
- Le changement climatique et l'impact environnemental des énergies fossiles se font de plus en plus menaçants.
- La gestion contradictoire d'une demande croissante d'énergie et l'épuisement des ressources fossiles mondiales restent un défi à relever.
- Les Mâts des éoliennes très hauts dépassant parfois 80 mètres avec des pales de plus de 45 mètres de longueur engendrant des problèmes de vibration et de flambement des installations. De plus, souvent installées à proximité de la population, elles constituent une source d'insécurité.
- La Nécessité de freinage du système pour des plages de vitesses données.
- Les Nuisances sonores et l'inconfort engendrés par les parcs éoliens.

3. Objectifs de la recherche

L'objectif principal de cette thèse est de proposer un nouveau dispositif éolien qui apporte un début de solutions aux problèmes posés aux dispositifs classiques tout en améliorant la puissance fournie. Ce dispositif, résultat d'une conception d'un nouveau module dénommé convergent, permet d'optimiser les paramètres de sortie tout en respectant les contraintes physiques et de matériaux.

Cet objectif se décline en plusieurs tâches spécifiques définies comme suit :

- Concevoir un dispositif éolien ;
- Réaliser le dispositif ;
- Mettre en œuvre le dispositif ;
- Comparer les performances et le coût de ce dispositif aux éoliennes classiques.

Le résultat attendu est un prototype éolien opérationnel qui maximise la puissance de sortie. Il doit pouvoir être exploité dans n'importe quelle zone dès lors que certains minima de vitesses de vent sont atteints. Les travaux de réalisation, de test et validations du prototype ont eu lieu dans l'atelier de fabrication mécanique du

département de Génie Mécanique et Énergétique de l'École Polytechnique de L'université d'Abomey Calavi.

4. Portée des travaux

Ce projet de recherche se propose de modéliser et d'expérimenter un nouveau dispositif éolien robuste, en se basant sur les principes de la mécanique des fluides et des simulations numériques. Les paramètres ciblés sont l'optimisation de la puissance de sortie et la réduction de l'encombrement en comparaison aux éoliennes classiques.

Une analyse de la variation relative des sections d'entrée et de sortie en rapport avec la conservation du débit de flux permet de caractériser le type et la forme du module d'accélérateur. À l'issue de cette analyse, l'accélérateur de flux convenable devant favoriser l'optimisation de la circulation du vent est un convergent.

Une simulation numérique avec en entrée différentes vitesses de vent permet de valider le choix du convergent opéré. À la suite de ces résultats, le module (nommé convergent) est fabriqué et testé.

Le critère de réussite de ce projet est la mise en œuvre du convergent pour maximiser la puissance de sortie du dispositif éolien, comme décrit par l'objectif spécifique de la section précédente.

5. Organisation et structure de la thèse

Cette thèse intitulée : « *modélisation théorique et expérimentation d'un système éolien à accélérateur de flux de vent* » se propose d'introduire un nouveau dispositif dans le système éolien qui améliore la vitesse du vent et qui permette une production d'énergie avec une bonne maîtrise des puissances générées. Elle s'articule essentiellement autour de trois chapitres décrits comme suit.

Une introduction générale comprenant les points suivants : une mise en situation, les défis de recherche liés à la production d'énergie éolienne, les objectifs à atteindre, la portée de l'étude et l'organisation la thèse.

Dans le but de mieux cerner les régimes du vent dans une localité susceptible d'accueillir le système proposé, **le premier chapitre** a fait l'historique et le point sur l'essentiel des connaissances sur les systèmes éoliens. Il a été aussi question d'analyser les paramètres qui influent sur la régularité des vents. Il a été ainsi possible de faire une étude de faisabilité, afin de prédéfinir les puissances susceptibles d'être installées, de connaître les périodes de grandes, moyennes, petites ou pas du tout de production.

Avec le convergent, il se pourrait que des vitesses dépassant la vitesse du son soient atteintes. L'air étant un fluide compressible, des problèmes d'ondes de choc pourraient se poser. C'est pourquoi dans le **deuxième chapitre**, les notions essentielles sur l'écoulement des fluides compressibles sont rappelées. Ce qui a permis de définir les plages de fonctionnement du dispositif, ainsi que ses limites.

Le **chapitre trois** présente les calculs de dimensionnement des éléments tournants du système éolien, le fonctionnement des deux cas d'utilisation possible du système et les étapes de fabrication de tous ses composants. Ce chapitre a traité aussi de l'**impact environnemental** et de l'**analyse économique** du nouveau dispositif.

Enfin, les conclusions et les recommandations basées sur le travail entrepris et les perspectives d'extension du dispositif à d'autres domaines sont présentées.

CHAPITRE 1 : ÉTAT DE L'ART DES DISPOSITIFS ÉOLIENS CLASSIQUES ET CARACTÉRISATION DE SITE ÉOLIEN

1. Introduction

En raison de l'intermittence et la variabilité des vents, les éoliennes sont des sources d'énergie instables. Mais il est bien connu que le vent a l'avantage d'être une source d'énergie gratuite, renouvelable et qui s'exploite avec sécurité et respect environnemental. Les ressources d'énergie du vent sont pratiquement illimitées et bien réparties dans le monde entier. Cependant, les récentes recherches et les avancées dans les domaines des aérogénérateurs et les techniques de commandes avancées ont permis le contrôle et d'optimiser des puissances produites par ces nouvelles technologies, rendant ainsi l'énergie éolienne aussi compétitive que l'énergie d'origine traditionnelle [4].

Dans ce chapitre, une présentation de l'état de l'art sur l'énergie éolienne est faite ; suivi d'une description des différents types d'aérogénérateurs couramment utilisés pour la conversion d'énergie éolienne. Enfin, une étude de corrélation de certains paramètres météorologiques est proposée pour ressortir leur influence sur la variation des régimes de vent.

2. Historique de l'éolien

L'énergie éolienne est l'une des premières énergies à être exploitée parmi toutes les énergies renouvelables. Elle fut utilisée tout d'abord pour la propulsion des bateaux et ensuite les moulins à grains et les constructions permettant le pompage d'eau. Les premières utilisations connues de cette énergie remontent à environ 2000 ans avant J.-C. Dans l'ancienne puissance de Babylone, tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie avait été conçu en utilisant la puissance du vent. 400 ans avant J.-C déjà, des descriptions écrites de l'utilisation des moulins à vent en Inde apparurent. Il faut attendre le moyen âge pour voir en Europe, les premiers moulins à vent. Dès le XIV^e siècle, les moulins à vent deviennent la principale source d'énergie en Europe. Déjà au Danemark et en Hollande, vers le milieu du 19^e siècle, le nombre des moulins est évalué à plus de 30000 et dans toute l'Europe à 200000. Avec l'apparition de la machine à vapeur, les moulins à vent commencent à disparaître de façon progressive [5].

Poul La Cour eu l'idée en 1891 d'associer une génératrice à une turbine éolienne avec l'arrivée de l'électricité. Ainsi, l'énergie provenant du vent a pu être redécouverte et réutilisée. Aux États-Unis, au début du siècle dernier, les aérogénérateurs ont fait une

apparition remarquée (environ six millions de pièces fabriquées). Ils étaient pratiquement le seul moyen d'obtention de l'électricité dans les campagnes isolées. Dans les années 60, on dénombrait environ 1 million d'aérogénérateurs dans le monde. La crise pétrolière de 1973 relance la recherche dans le domaine des éoliennes et leur exploitation [5].

L'évolution de l'industrie éolienne a été remarquable et, au cours des quatre dernières décennies, plusieurs étapes ont été franchies en matière d'installations, de progrès technologiques et de réduction des coûts, parallèlement à la création d'associations clés dans le domaine de l'énergie éolienne (figure 1.1). En 2020, l'éolien terrestre offre systématiquement une nouvelle source de production d'électricité moins coûteuse que l'alternative de combustible fossile la moins coûteuse dans la plupart des régions [6].

CHAPITRE 1 : ÉTAT DE L'ART DES DISPOSITIFS ÉOLIENS CLASSIQUES ET CARACTÉRISATION DE SITE ÉOLIEN

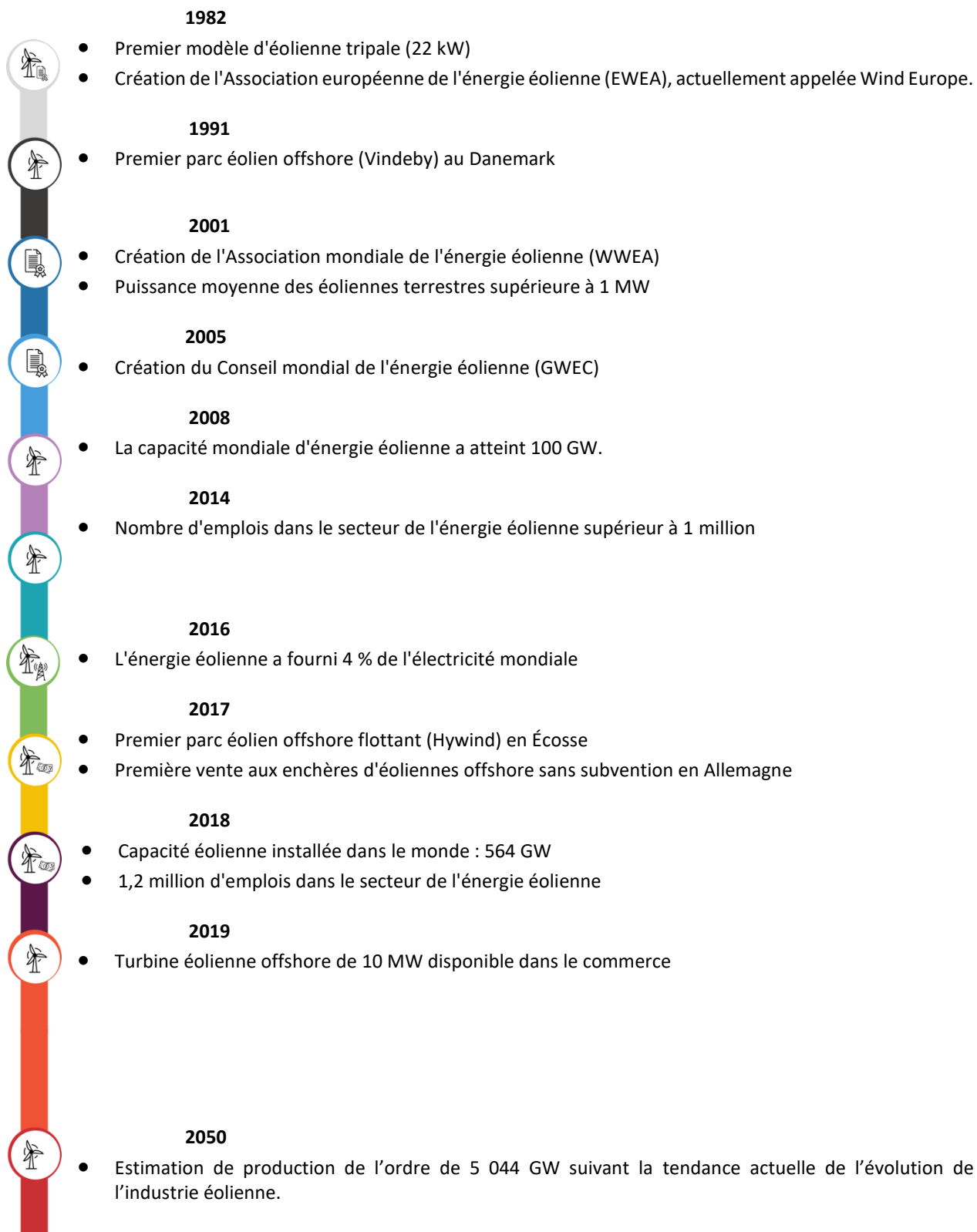


Figure 1 1: Aperçu des principales étapes franchies par l'industrie éolienne depuis 1982 [6]

3. Définitions relatives à l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui convertit une partie de l'énergie cinétique du vent (l'air en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [7 - 8]. La figure 1.2 représente le dispositif de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

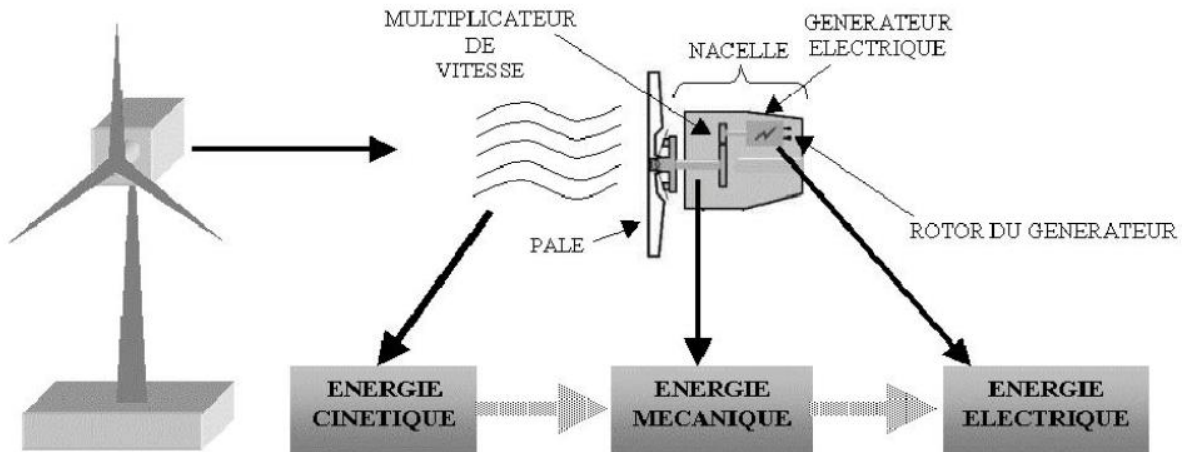


Figure 1.2: Conversion de l'énergie cinétique du vent

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable géographiquement bien répartie. Elle est en parfaite corrélation avec les saisons (la demande en Hiver de l'énergie électrique est généralement bien supérieure, et c'est généralement à cette période que la moyenne des vitesses des vents est meilleure) [7 - 9].

3.1. Constitution d'un système éolien

Le système de conversion éolien est principalement constitué de : [10]

- Une turbine éolienne avec ses annexes mécaniques dont le rôle est de convertir une partie de l'énergie du vent en travail mécanique.
- Un générateur électrique qui convertit une partie de l'énergie mécanique disponible sur l'arbre en énergie électrique.
- Une charge électrique qui peut être statique ou dynamique, ou un réseau de distribution d'énergie électrique.
- Une interface d'électronique de puissance, qui est en général placée entre le générateur et la charge, qui adapte la forme de l'énergie électrique fournie par le générateur à ce qu'exige la charge.
- Un système de commande et de régulation qui assure la conversion optimale en régime stationnaire et, éventuellement, en régime dynamique.

3.2. Différents types d'aérogénérateurs

Les génératrices éoliennes peuvent être regroupées selon différentes catégories, et un classement est proposé selon les critères suivants :

- La nature du convertisseur électromécanique utilisé ;
- Le type de capteur ;
- Le mode de régulation ;
- La nature de l'accouplement mécanique (présence de multiplicateur de vitesse ou en attaque directe) ;
- Le mode de fonctionnement (vitesse variable ou constante).

3.2.1. Classification selon l'orientation de l'axe de rotation

a. Éolienne à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus communes. Le grand avantage de cette éolienne est son rendement, notamment quand elle comprend un système d'orientation des pales en fonction du vent. Ces éoliennes sont également jugées plus solides et engendrent de faibles coûts d'entretien. De plus, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques [5]. Elles sont constituées d'une ou plusieurs pales pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le plus souvent le rotor de ces éoliennes est tripale, car trois pales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation. D'autre part, elles présentent un aspect esthétique meilleur aux bipales [11].

Cette éolienne capte le vent grâce à des pales assemblées sous forme d'hélice. Ces pales tournent autour d'un axe disposé horizontalement par rapport au sol, d'où son nom. La figure 1.3 suivante montre les modèles d'éoliennes à axe horizontal.

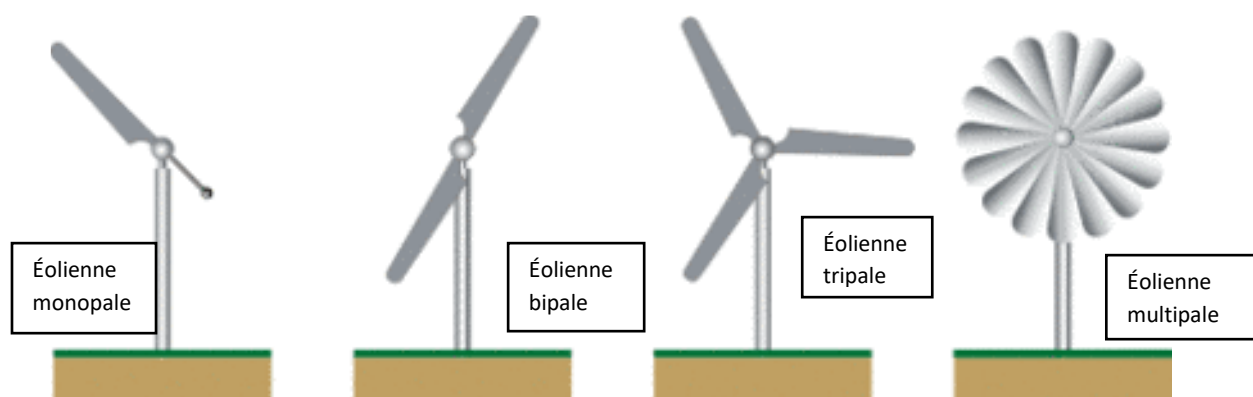


Figure 1. 3: Les éoliennes à axe horizontal [11].

Il existe deux catégories d'éoliennes à axe horizontal :

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

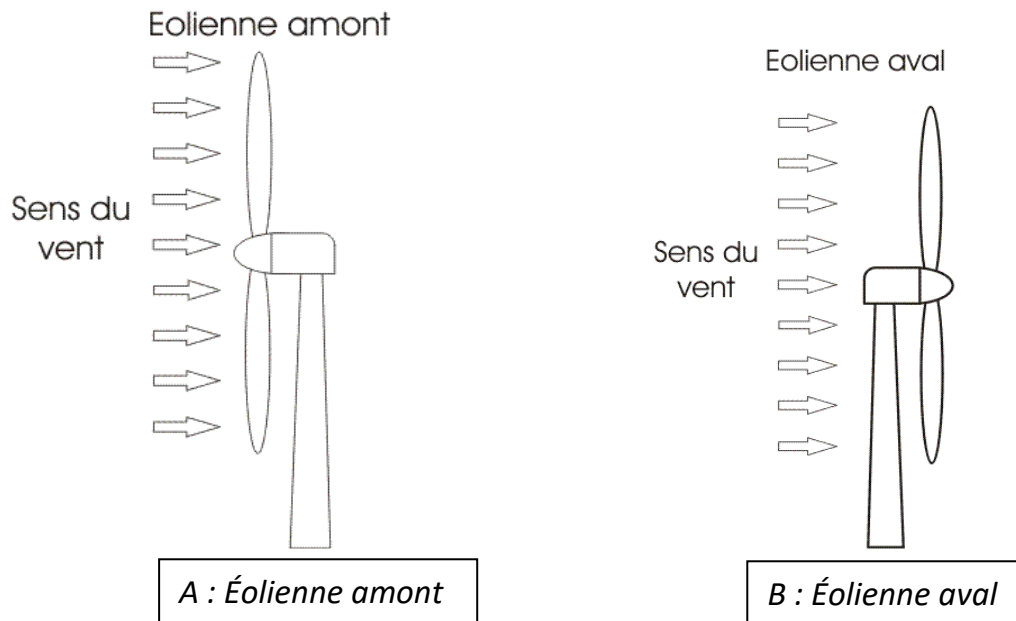


Figure 1. 4: Éoliennes amont et aval [12].

b. Éolienne à axe vertical

Ce sont les premières éoliennes développées pour produire de l'électricité. Contrairement à l'éolienne horizontale, l'éolienne verticale tourne autour d'une tige positionnée de manière verticale. L'un des principaux atouts de ce type d'éolienne est de réussir à capter des vents faibles et cependant produire de l'énergie.

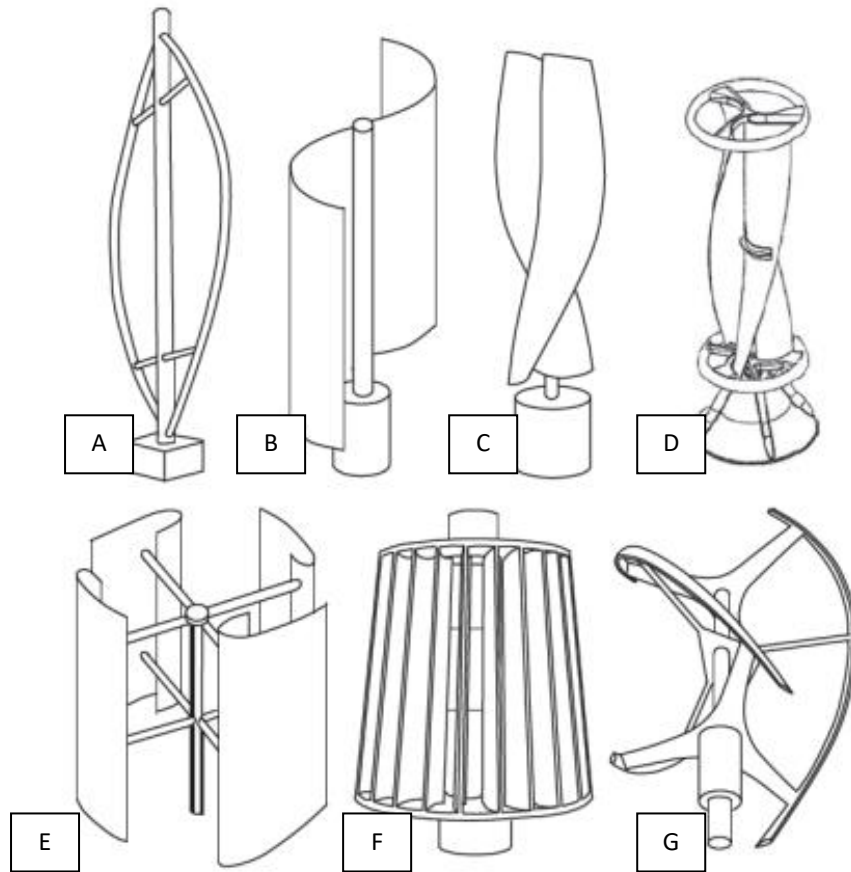


Figure 1. 5: Quelques représentations simplifiées d'éoliennes à axe vertical

La figure 1.5 montre quelques variantes d'éoliennes à axe vertical. Ce sont le rotor Darrieus (A), Savonius (B), Solar Wind (C), Hélicoïdal (D), Noguchi (E), Maglev (F) et le rotor Cochrane (G)

Parmi ces éoliennes verticales, deux types se démarquent aujourd'hui sur le marché :

❖ **L'éolienne de rotor Darrieus :**

L'éolienne **Darrieus** est une éolienne qui se base sur un rotor en H, cylindrique ou hélicoïdal (figure 1.6), qui tourne autour d'une tige fixe. Ce type d'éolienne verticale a de nombreux avantages dont celui de pouvoir fonctionner dans des endroits très éventés et de faire moins de bruit comparé aux autres éoliennes du marché. L'inconvénient de ce type d'éolienne est d'avoir besoin d'un vent relativement fort pour son amorçage (3 m/s^{-1} en moyenne).

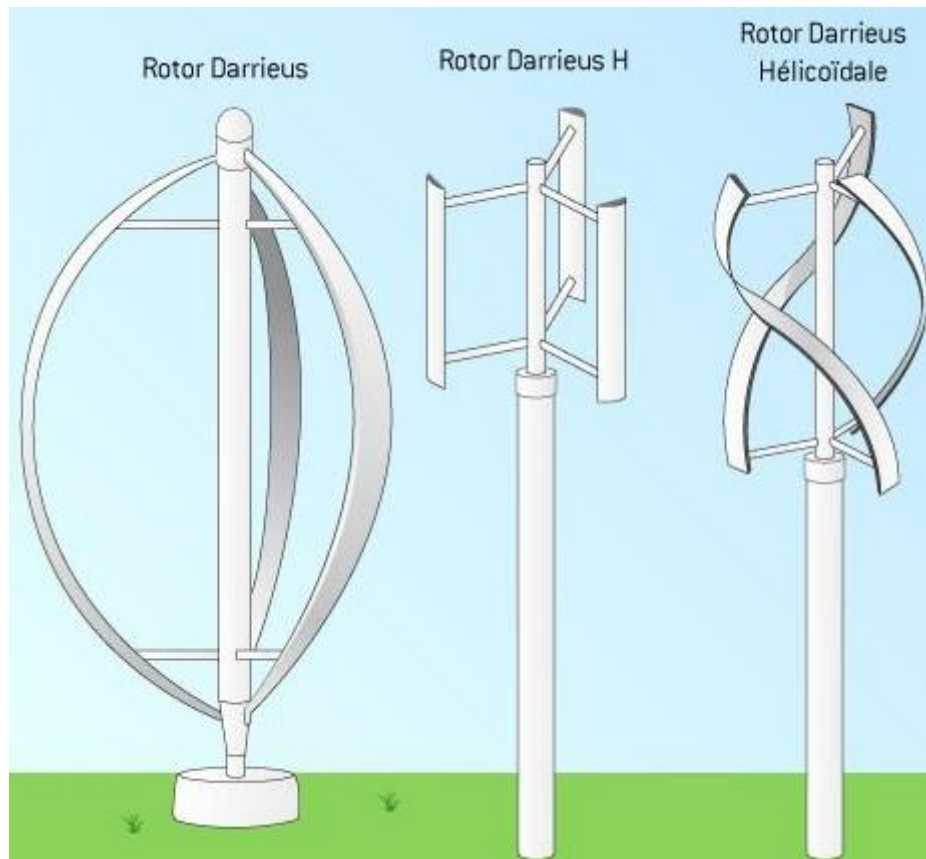


Figure 1. 6: Éoliennes de type Darrieus [13].

➤ **L'éolienne de rotor Savonius**

Ce type d'éolienne a l'avantage d'être particulièrement simple à installer, car peu encombrant. Le principe consiste en ce que deux demi-cylindres tournent, s'entraînant l'un et l'autre, et ce même avec un vent très léger. Pendant que le rotor Darrieus a besoin d'un vent d'amorçage relativement fort, le Savonius démarre avec un vent relativement faible. Cette aptitude du Savonius s'explique par son design et fait de lui l'un des dispositifs préférés des utilisateurs. Cependant, les deux fonctionnent sous un régime de vent faible.

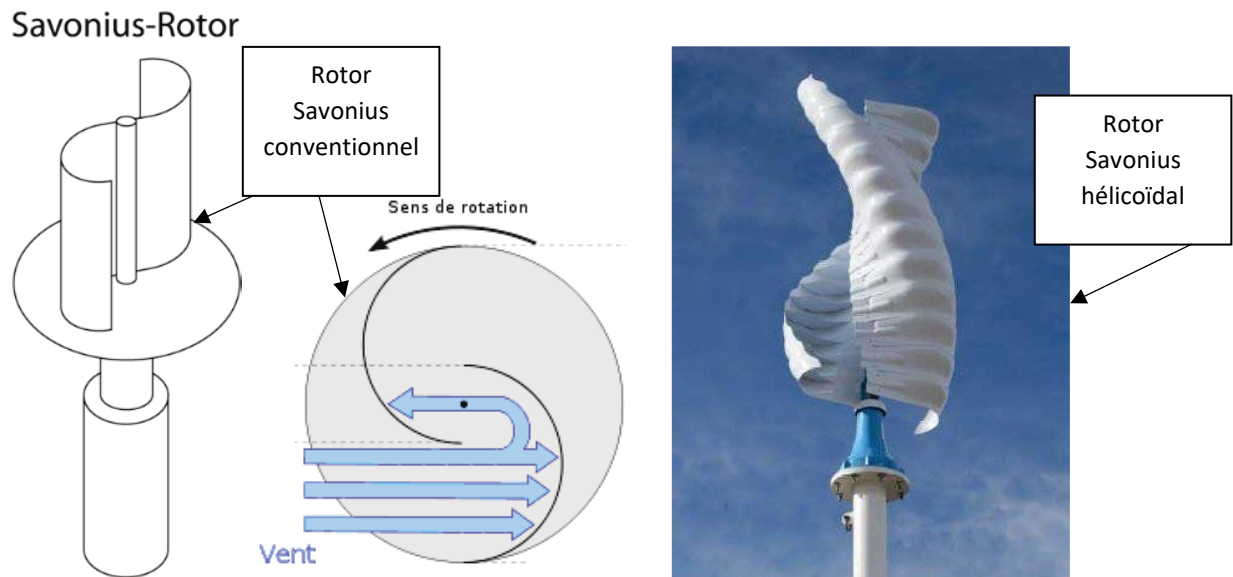


Figure 1. 7: Éolienne type Savonius conventionnel et Savonius hélicoïdal [13]

La figure 1.7 présente deux modèles de rotor Savonius : conventionnel et hélicoïdal. Le rotor hélicoïdal est une variante du rotor conventionnel avec les pales vrillées. Pour les utilisations domestiques, ce dernier est plus utilisé parce qu'il est plus stable et développe un meilleur rendement.

Le Tableau suivant résume les points forts et faibles de chaque type de turbine. Pour les applications à grande puissance, les éoliennes à axe horizontal (EAH) dominent le marché grâce à leur fort rendement et leur accès au vent fort. Cependant, les éoliennes à axe vertical (EAV) sont plus appropriées pour les applications domestiques. Elles peuvent être facilement installées sur des toits d'immeubles et bénéficier pour cela d'un régime de vent convenable pour leur fonctionnement. Ce qui leur confère un accès facile pour leur maintenance.

Tableau 1. 1: Résumé des avantages et inconvénients des deux dispositifs

Types de Turbines	Avantages	Inconvénients
Éoliennes à Axe Horizontal (EAH)	• Fort rendement de conversion d'énergie • Accès au vent plus fort • Régulation de la puissance via décrochage et calage en cas de vent dépassant les limites nominales	• Coût d'installation élevé, mat robuste supporter le poids de la nacelle. • Des câbles plus longs du haut de la tour jusqu'au la terre • Systèmes d'orientation requis
Éoliennes à Axe Vertical (EAV)	• Fort rendement de conversion d'énergie • Accès au vent plus fort • Régulation de la puissance via décrochage et calage en cas de vent dépassant les limites nominales	• Rendement moins faible • Fluctuation importante du couple et fortes vibrations mécaniques • Solutions limitées pour la régulation en cas de rafale de vent.

3.2.2. Classification selon la vitesse : fixe ou variable

a. Éolienne à vitesse fixe.

Les turbines éoliennes peuvent également être classifiées en des turbines à vitesse fixe et à vitesse variable. Comme leur nom l'indique, les turbines à vitesse fixe tournent à une vitesse relativement constante. Cette vitesse est déterminée par le rapport du réducteur de vitesse, la fréquence du réseau électrique et le nombre de pôles de la génératrice. Ces turbines atteignent un rendement de conversion maximum uniquement pour une vitesse de vent donnée, et l'efficacité du système se dégrade une fois que la vitesse de vent change. La turbine à vitesse fixe est protégée par un contrôle aérodynamique des éventuelles rafales de vent. Elle génère une puissance électrique très fluctuante par rapport aux autres dispositifs qui offrent une énergie constante dans le temps.

b. Éolienne à vitesse variable

Les turbines à vitesse variable quant à elles, peuvent atteindre un rendement de conversion d'énergie sur une vaste plage de vitesse de vent. La turbine change constamment sa vitesse de rotation dépendamment de la vitesse du vent pour maximiser la puissance. Dans ce cas, la vitesse spécifique λ , qui représente la vitesse du bout de la pale par rapport à la vitesse du vent, peut être maintenue dans ces

valeurs optimales de manière à réaliser une extraction maximale de la puissance électrique. Afin que la vitesse de la turbine soit ajustable, l'éolienne est connectée au réseau électrique via des convertisseurs de puissance.

Comme le montre le tableau ci-dessous, les principaux avantages des turbines à vitesse variable sont : leur rendement de conversion d'énergie élevé, leur énergie électrique de bonne qualité et qui ne présente aucune nuisance pour le réseau électrique, et finalement un moindre stress mécanique sur l'ensemble de la chaîne mécanique. Leurs principaux inconvénients sont le coût de construction et les pertes énergétiques dues à l'utilisation des convertisseurs de puissance.

Tableau 1. 2: Résumé des avantages et inconvénients des éoliennes a vitesse fixe et a vitesse variable

Mode de fonctionnement	Avantages	Inconvénients
Vitesse fixe	• Simple, robuste, fiable. • Coût de construction et maintenance bas	• Rendement plutôt faible • Fort stress mécanique qui augmente le coût de la structure • Fluctuation importante de la puissance
Vitesse variable	• Bon rendement • Puissance électrique de meilleure qualité • Stress mécanique réduit	• Coût et pertes supplémentaires dus à l'utilisation des convertisseurs • Contrôle du système plus compliqué

4. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne a des avantages propres permettant sa croissance et son évolution par rapport aux autres sources d'énergie, ce qui va lui donner un rôle primordial dans l'avenir, à condition de trouver les moyens d'atténuer l'impact créé par ses inconvénients.

4.1. Avantages

L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement :

- L'exploitation d'énergie éolienne ne produit pas directement de CO₂.
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est-à-dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.

- Chaque unité d'électricité produite par un aérogénérateur supplante une unité d'électricité qui aurait été produite par une centrale consommant des combustibles fossiles. Ainsi, l'exploitation de l'énergie éolienne évite déjà aujourd'hui l'émission de 6,3 millions de tonnes de CO₂, 21 mille tonnes de SO₂ et 17,5 mille tonnes de Nox [15]. Ces émissions et d'autres appelées Gaz à effet de serre sont les principaux responsables des pluies acides et de la dégradation de la couche d'ozone.
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs.
- On peut facilement l'adapter à une utilisation à l'échelle des ménages. De ce fait, elle contribue à la stimulation de l'économie locale, notamment dans les zones rurales.
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres.
- C'est l'énergie la moins chère parmi les énergies renouvelables.
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement nécessaire est compétitif par rapport aux énergies traditionnelles.
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle [15].
- L'énergie éolienne est bon marché : elle peut concurrencer le nucléaire, le charbon et le gaz lorsque les règles du jeu sont équitables. De plus, les activités agricoles/industrielles peuvent se poursuivre aux alentours [14].
- Ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant.

4.2. Inconvénients

L'énergie éolienne possède aussi des désavantages qu'il faut citer :

- Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée.

- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux [15 - 16].
- La qualité de la puissance électrique : la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau est faible. Mais avec le progrès technologique réalisé dans le domaine du développement de l'éolien, ce pourcentage s'est nettement amélioré [15].
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques : en termes de coût, l'éolien, sur les sites où il y a de bons régimes de vent, concurrence pratiquement toutes les sources d'énergie. Cependant, on ne peut pas en dire autant lorsque les sites sont moins ventés [15].

5. État de l'art des dispositifs éoliens, de leur optimisation et leur défauts structurels

En général, les éoliennes sont principalement utilisées pour convertir l'énergie cinétique de l'air en mouvement en une énergie mécanique rotative qui sera convertie en énergie électrique par des générateurs [17]. L'énergie produite par les éoliennes dépend généralement de l'emplacement géographique, des conditions météorologiques et du type d'éoliennes [18]. Ces dernières peuvent être classées, en fonction de la configuration et de l'orientation de leur axe de rotation, en éoliennes à axe horizontal (EAH) et en éoliennes à axe vertical (EAV) [19]. Plusieurs études se sont attachées à comparer ces deux modèles d'éoliennes et à mettre en évidence les avantages et les limites de chaque type [20 - 22]. Les EAH permettent d'obtenir des rendements énergétiques plus élevés et donc de réduire le coût de l'énergie produite, mais cela n'est possible qu'avec des vitesses de vent élevées. En outre, les turbulences, les variations ou la variabilité directionnelle excessive du vent peuvent entraîner des problèmes importants dans l'utilisation des EAH. D'autre part, les EAV ont démontré leur capacité à répondre à certaines exigences de production d'énergie qui ne peuvent pas être satisfaites par les EAH [22]. Malgré le rendement inférieur et la production variable des EAV, divers avantages des EAV qui pourraient l'emporter sur leurs limites sont mis en évidence, en particulier dans certaines circonstances. Plus précisément, les EAV sont presque capables d'exploiter le vent dans toutes les directions, de sorte qu'elles peuvent fonctionner, quelle que soit la direction du vent. En outre, ces turbines n'ont pas besoin de vitesses de vent élevées pour produire de l'énergie. Elles peuvent donc être installées dans des endroits où la vitesse du vent est modeste et

peuvent être fixées près du sol, ce qui facilite la maintenance et le contrôle. D'autre part, comme elles génèrent des forces plus faibles sur leur structure de support, leur conception structurelle est plus simple et elles sont moins bruyantes [21]. De même, les EAV peuvent constituer une solution prometteuse pour la production d'électricité dans des endroits distincts éloignés des réseaux intégrés [23].

Fondamentalement, il existe plusieurs variantes de conception de dispositifs éoliens en fonction des principes de fonctionnement, de la forme des pales et de leur configuration. Un examen complet de ces différents types et de leurs performances a été présenté par [23, 24]. Ainsi, on trouve des éoliennes à flux transversal [25], à dispositifs d'augmentation de la puissance tels que le stator, les aubes directrices et la tuyère [26], à convergent de flux [27], caisson symétrique [28], à rangée d'aubes directrices [29], à ailettes de guidage omnidirectionnelles (ODGV) [30], à booster de vent [31]. En général, les EAV peuvent être classés en deux catégories principales. La première est le type Savonius qui est une turbine mue par la traînée, tandis que l'autre est le type Darrieus qui est une turbine entraînée par la portance [20]. Malgré la simplicité et la vitesse de démarrage plus élevée des turbines à traînée, par rapport à celles à portance, elles s'accompagnent de niveaux de performance inférieurs [32, 33]. En conséquence, la conception d'une turbine combinée Savonius-Darrieus pour exploiter les avantages des deux types a été étudiée [34 - 37].

Plusieurs travaux scientifiques ont abordé l'évaluation et l'amélioration des performances des turbines éoliennes au cours des deux dernières décennies. Les performances de différentes conceptions et configurations des éoliennes ainsi que l'effet des paramètres de conception ont été étudiés en utilisant diverses approches. Des tests expérimentaux en soufflerie [38 - 40] et des simulations de dynamique des fluides (CFD) ont été utilisées efficacement pour étudier les performances mécaniques des éoliennes [32, 39 et 40]. D'autres équipes de recherches ont utilisé des expériences sur le terrain pour étudier l'effet de certaines variables du vent telles que la vitesse, la direction du vent et l'intensité des turbulences [41, 42]. En ce qui concerne l'amélioration des caractéristiques des EAV, différentes modifications et optimisations de la conception ainsi que des idées de conception innovantes ont été étudiées. En général, l'effet des paramètres de forme des pales sur la capacité d'autodémarrage et l'efficacité de l'extraction d'énergie a retenu l'attention des scientifiques [43 - 46]. Cependant, d'autres se sont concentrés sur l'amélioration des performances en utilisant des pales composites [47, 48]. En outre, l'effet du nombre de pales utilisées dans certaines turbines a également été étudié [42, 49 et 59]. Par ailleurs, certains chercheurs se sont concentrés sur l'utilisation de différentes configurations des pales de la turbine, comme la turbine à axe transversal proposée dans [37, 51]. D'autres

encore ont encouragé l'emploi de différents dispositifs de guidage du vent pour améliorer les performances de l'éolienne, tels que des fourgons de guidage, des pare-vent et des déflecteurs. Une revue complète de ces dispositifs et de leur effet sur la capacité d'autodémarrage ainsi que sur la puissance générée a été fournie dans [52].

Il est bien connu que les éoliennes fonctionnent directement dans le vent, la pluie, la neige et d'autres environnements difficiles. Le diamètre des pales des éoliennes devient de plus en plus grand afin de capter davantage d'énergie éolienne. Cela favorise l'apparition de certains défauts directement sur les pales, tels que le déséquilibre du rotor, la corrosion des pales et du moyeu, les fissures et les déflexions aéroélastiques graves dans les grandes éoliennes [53]. La surchauffe au niveau des roulements est un autre défaut typique d'éoliennes et peut avoir un impact sur les performances de l'éolienne en fonctionnement. À cela s'ajoutent les problèmes [54] au niveau du générateur. Venkata Yaramasu et al (2017) [55] dans leur revue sur les technologies de pointe et émergentes des systèmes de conversion d'énergie éolienne de haute puissance, ont montré que les vents de vitesse élevée non contrôlés ont des effets destructeurs sur la structure du mât et des pales. Une usure accélérée des dentures au niveau du multiplicateur est aussi observée.

Le développement récent de grandes éoliennes avec un diamètre de rotor de plus de 130 m fait qu'elles génèrent plus d'énergie tout en réduisant le coût unitaire. Mais une pale de cette taille est très flexible et vibre plus fortement en raison de la charge du vent [56]. La vibration des pales devient un problème inquiétant de nos jours, car ces pales sont minces et très flexibles. Ils sont soumis à de fortes vibrations et à des charges de fatigue élevées.

6. Méthodes de caractérisation du potentiel éolien

Les méthodes de caractérisation du potentiel éolien les plus fréquemment utilisées sont présentées dans cette partie. Elle traite des modèles mathématiques d'analyse des vents, en particulier la loi de distribution de Weibull, les méthodes d'ajustement des paramètres de Weibull, l'extrapolation verticale de la vitesse du vent et des paramètres de Weibull.

6.1. Modèles d'analyse des vents

Pour caractériser le potentiel éolien d'un site, il est important de connaître la distribution de fréquence du vent sur le site. Les distributions réelles des vitesses de vent n'étant pas toujours disponibles, elles sont le plus souvent modélisées à partir des fonctions puissance et exponentielles dont les principales sont [57 - 58] :

- La distribution de Weibull ;
- La distribution hybride de Weibull ;
- La distribution de Rayleigh.

6.1.1. Distribution de Weibull

La fonction de distribution de Weibull est une fonction exponentielle à deux paramètres : le paramètre d'échelle c ($m.s^{-1}$) et le paramètre de forme k (sans dimension). Le paramètre c renseigne sur la moyenne des vitesses de vent caractéristique du site, tandis que le paramètre k donne le caractère plus ou moins pointu de la distribution. En effet, une valeur élevée de k implique une distribution étroite avec des vents concentrés autour d'une valeur, alors qu'une faible valeur conduit à des vents largement dispersés [59]. La distribution de Weibull s'exprime par sa fonction de densité de probabilité f donnée par [57 -58 ; 60 - 61] :

$$f(U) = \frac{d}{dU}(F(U)) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{U}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right) \quad (1.1)$$

La densité de probabilité $f(U)$ représente la distribution en fréquences des vitesses de vents mesurées en assimilant les fréquences aux probabilités ; k et c paramètres de Weibull et U la vitesse du vent. La connaissance de la distribution des vents sur un site donné résulte de la détermination des deux paramètres de Weibull.

La fonction de distribution cumulée de Weibull correspondante $F(U)$ s'écrit par [58 ; 59 ; 61] :

$$F(U) = \int_0^U f(U)dU = 1 - \exp\left(-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right) \quad (1.2)$$

La probabilité pour que la vitesse du vent soit supérieure à une valeur U_x , qui peut être le seuil de démarrage est [58 ; 59 ; 61] :

$$F(U \geq U_x) = \int_{U_x}^{\infty} f(U)dU = \exp\left[-\left(\frac{U_x}{c}\right)^k\right] \quad (1.3)$$

La fréquence avec laquelle la vitesse du vent sera dans un certain intervalle est déterminée par l'intégration de la fonction de densité de probabilité dans l'intervalle appropriée [59] :

$$F(U_1 \leq U \leq U_2) = \int_{U_1}^{U_2} f(U)dU = \exp\left[-\left(\frac{U_1}{c}\right)^k\right] - \exp\left[-\left(\frac{U_2}{c}\right)^k\right] \quad (1.4)$$

La vitesse moyenne du vent peut être trouvée en intégrant la fonction de densité de probabilité [60] :

$$U_m = \int_0^{\infty} U * f(U) * dU \quad (1.5)$$

En remplaçant $f(U)$ par son expression, la vitesse moyenne devient :

$$U_m = \int_0^{\infty} U \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{U}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right) dU \quad (1.6)$$

D'où l'expression arrangée :

$$U_m = k \int_0^{\infty} \left(\frac{U}{c}\right)^k \exp\left(-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right) dU \quad (1.7)$$

En posant : $x = \left(\frac{U}{c}\right)^k$ cela implique $dU = \frac{c}{k} x^{\frac{1}{k}-1} dx$

En remplaçant dU dans la précédente équation, la vitesse moyenne devient :

$$U_m = c \int_0^{\infty} x^{\frac{1}{k}} * \exp(-x) dx \quad (1.8)$$

Sachant que la fonction Gamma a pour expression :

$$\Gamma(n) = \int_0^{\infty} \exp(-x) x^{n-1} dx \quad (1.9)$$

En posant $n = \frac{1}{k} + 1$, la vitesse moyenne s'écrit finalement par :

$$U_m = \begin{cases} c * \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \\ \sum_{i=1}^N U_i p_i(U_i) \end{cases} \quad (1.10)$$

Les paramètres c et k étant des constantes à estimer pour avoir accès définitivement à la vitesse moyenne U_m dans le cas d'une distribution continue. L'approche de leur détermination est donnée dans la section 5.2 qui suivra.

6.1.2. Distribution hybride de Weibull

La distribution hybride de Weibull est utilisée dans le cas d'un site où la fréquence des vents calmes (vents dont la vitesse est inférieure à 1 m.s^{-1}) enregistrée est supérieure ou égale à 15% du total des vents, car la distribution de Weibull n'est pas adaptée. En effet, cette proportion assez significative des vents calmes ne peut être négligée et doit être prise en compte lors de la caractérisation du potentiel éolien d'un site donné [57 ; 58]. La distribution hybride de Weibull est définie par la fonction de densité de probabilité f_{hw} décrite par :

$$f_{hw}(U) = \begin{cases} F_0 & \text{pour } U = 0 \\ (1 - F_0) \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{U}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right) & \text{Pour } U > 0 \end{cases} \quad (1.11)$$

Où F_0 représente la fréquence des vents calmes.

6.1.3. Distribution de Rayleigh

La distribution de Rayleigh est un cas particulier de la distribution de Weibull. C'est le cas où le paramètre de forme k est égal à 2. La fonction de densité de probabilité s'écrit [57 ; 58] :

$$f_R(U) = 2 \times \frac{U}{c^2} \exp\left(-\left(\frac{U}{c}\right)^2\right) \quad (1.12)$$

Toutefois, pour une meilleure caractérisation du potentiel éolien d'un ou des site(s) donné(s), la distribution de Weibull classique en fonction des deux paramètres k et c , est la plus indiquée ; car l'utilisation de ces deux paramètres permet l'évaluation d'un nombre important des propriétés de la distribution [58].

6.2. Méthodes d'ajustement des paramètres de Weibull

Pour ajuster les paramètres de Weibull k et c à partir des données statistiques du vent, plusieurs méthodes sont utilisées. Quatre méthodes parmi les plus couramment utilisées sont présentées ci-après :

6.2.1. Calcul par l'écart-type et la vitesse moyenne

Si la vitesse moyenne et l'écart-type sont disponibles, l'estimation des paramètres k et c se fait en utilisant les deux relations suivantes [57 ; 58 ; 67] :

$$k = \left(\frac{\sigma}{U_m}\right)^{-1,086} \quad \text{et} \quad c = \frac{U_m}{\Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)} \quad (1.13)$$

U_m est la vitesse moyenne (en $m.s^{-1}$) et σ est l'écart-type (en $m.s^{-1}$).

L'expression de c dérive de la définition de la fonction de Weibull, celle de k est une approximation du coefficient de variation $\frac{\sigma}{U_m}$:

$$\left(\frac{\sigma}{U_m}\right)^2 = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)}{\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)} - 1 \quad (1.14)$$

6.2.2. Calcul par la méthode des moindres carrés

Pour la détermination des paramètres de Weibull k et c , on peut utiliser la formule de la fonction de distribution cumulée de Weibull F qui s'écrit par [58 ; 59] :

$$F(U) = \int_0^U f(U)dU = 1 - \exp\left(-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right) \quad (1.15)$$

En utilisant le logarithme, cette fonction est transformée en :

$$\ln[-\ln(1 - F(U))] = k \ln(U) - k \ln(c) \quad (1.16)$$

La vitesse étant connue, on peut connaître k et c par régression linéaire en utilisant la méthode des moindres carrés qui consiste à ajuster les points expérimentaux à travers la relation [59] :

$$y = ax + b \quad \text{où} \quad y = \ln[-\ln(1 - F(U))] \quad \text{et} \quad x = \ln(U)$$

Dans ce cas on aura les expressions de k et c qui sont :

$$k = a \quad \text{et} \quad c = \exp\left(-\frac{b}{a}\right) \quad (1.17)$$

6.2.3. Méthode du Facteur d'Énergie EPF

Les paramètres de Weibull sont estimés par les expressions qui suivent. k qui désigne le facteur de forme est déterminé par la relation [62-64]:

$$k = 1 + \frac{3,69}{(E_{pf})^2} \quad (1.18)$$

Avec E_{pf} : énergie de facteur obtenue en fonction de la vitesse instantanée U_i .

$$E_{pf} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i^3}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i\right)^3} \quad (1.19)$$

c est donné par :

$$c = \frac{U_m \times k^{2,6674}}{0,184 + 0,8116 \times k^{2,73855}} \quad (1.20)$$

6.2.4. Méthode de Mabchour

Cette méthode a été développée dans les travaux de H. Mabchour.1999 [65]. Les paramètres c et k s'établissent par les expressions qui suivent [66] :

$$k = 1 + 0,483 \times (U_m - 2)^{0,51} \quad (1.21)$$

$$c = \frac{1,125 \times U_m}{(1 - D)} \quad (1.22)$$

$$D = 1 - 0,81 \times (U_m - 1)^{0,089} \quad (1.23)$$

6.3. Extrapolation verticale de la vitesse du vent

Pour définir les caractéristiques d'un site éolien, il est impératif de connaître la hauteur sur laquelle les mesures sont prises et ensuite adapter les résultats à la hauteur du mât de l'éolienne. En effet, les mesures de la vitesse du vent sont généralement faites à 10 m du sol. La vitesse du vent étant une caractéristique qui augmente avec l'altitude et la rugosité du sol, il est donc primordial de l'estimer à différentes altitudes jusqu'à la hauteur du moyeu de la future éolienne. L'extrapolation verticale de la vitesse du vent d'un niveau Z_1 à un niveau Z_2 est obtenue par la loi de puissance suivante [11 ; 59 ; 67] :

$$U(Z_2) = U(Z_1) \left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)^\alpha \quad (1.24)$$

La valeur de l'exposant α , dit coefficient de friction, dépend de plusieurs facteurs comme la rugosité, la topographie et la stabilité de l'atmosphère.

$$\alpha = f(\text{rugosité}, \text{topographie}, \text{stabilité de l'atmosphère})$$

Plusieurs lois de puissance sont utilisées pour déterminer cette fonction :

6.3.1 Loi de puissance Justus-Mikhaïl

Pour une rugosité du sol comprise dans la gamme $0,05m \leq Z_0 \leq 0,5m$; [Justus et al, 1976], ont proposé une expression pour l'exposant de la loi de puissance permettant l'extrapolation de la vitesse instantanée de vent donnée par [58 ; 67] :

$$\alpha = m + n \ln U_1 \quad (1.25)$$

où m et n sont des constantes dont les valeurs dépendent de la hauteur de positionnement de l'anémomètre. Elles sont exprimées par les expressions suivantes :

$$m = \frac{0,37}{\left(1 - 0,0881 \ln\left(\frac{Z_1}{10}\right)\right)} \quad \text{et} \quad n = \frac{-0,0881}{\left(1 - 0,0881 \ln\left(\frac{Z_1}{10}\right)\right)}$$

Finalement le coefficient α s'écrit :

$$\alpha = \frac{0,37 - 0,0881 \ln U_1}{\left(1 - 0,0881 \ln\left(\frac{U_1}{10}\right)\right)} \quad (1.26)$$

6.3.2 Loi de puissance à coefficient variable

Pour tenir compte des différentes valeurs de la rugosité de la surface du sol, l'expression du coefficient de friction α peut s'écrire sous la forme suivante [59] :

$$\alpha = \frac{x - 0,0881 \ln(U_1)}{1 - 0,0881 \ln\left(\frac{Z_1}{10}\right)} \quad (1.27)$$

avec:

$$\begin{aligned} x &= 0,25 \text{ si } 0 < Z_0 \leq 0,005m; \\ x &= 0,31 \text{ si } 0,005 < Z_0 \leq 0,05m; \\ x &= 0,37 \text{ si } 0,05 < Z_0 \leq 0,5m; \\ x &= 0,48 \text{ si } 0,5 < Z_0 \leq 4m. \end{aligned}$$

On constate que le coefficient varie en fonction de la rugosité.

6.4. Extrapolation verticale des paramètres de Weibull

Pour une altitude de référence égale à 10 m, la relation permettant l'extrapolation verticale des paramètres de Weibull d'un niveau Z_1 à un niveau Z_2 est donnée par [57 ; 58 ; 60] :

$$k_2 = k_1 \left[\frac{1 - 0,0881 \ln\left(\frac{Z_1}{10}\right)}{1 - 0,0881 \ln\left(\frac{Z_2}{10}\right)} \right] \quad (1.28)$$

$$\text{et} \quad c_2 = c_1 * \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^p \quad (1.29)$$

$$\text{avec : } p = \frac{0,37 - 0,0881 \ln c_1}{1 - 0,0881 \ln(z_1/10)}$$

6.5. Définition des paramètres du vent

Pour déterminer les facteurs éoliens qui caractérisent un site, on utilise les paramètres suivants [15] :

- La vitesse moyenne du vent ;
- La vitesse cubique moyenne du vent ;
- L'indice de variation ;
- Le facteur de puissance ;
- La variance de la distribution des vitesses ;
- La rose des vents.

6.5.1 Vitesse moyenne et vitesse cubique moyenne

Pour une meilleure caractérisation du potentiel éolien d'un site, il est nécessaire de connaître la vitesse moyenne et la vitesse cubique moyenne du site. Partant des mesures du vent (vitesse et direction), la vitesse moyenne pondérée s'écrit par [4 ; 6 ; 61] :

$$\bar{U} = \int_0^{\infty} U \times f(U) dU \quad (1.30)$$

La vitesse cubique moyenne est donnée par la relation suivant :

$$\overline{U^3} = \int_0^{\infty} U^3 \times f(U) dU \quad (1.31)$$

Le tableau qui suit donne les expressions relatives aux différents modèles d'analyse des vents :

Tableau 1. 3: Expressions des modèles d'analyse des vents [57].

Distributions	U	U^3
Weibull	$c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$	$c^3\Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right)$
Hybride de Weibull	$(1 - F_0)c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$	$(1 - F_0)c^3\left(1 + \frac{3}{k}\right)$
Rayleigh	$0,886c$	$1,32c^3$

6.5.2 La variance de la distribution des vitesses

La variance de la distribution des vitesses caractérise la turbulence globale du vent horizontal sur toute la gamme de fréquences [17 ; 18]. La variance est donnée par :

$$Var(U) = \sigma(U)^2 = \int_0^{\infty} (U - \bar{U})^2 f(U) dU \quad (1.32)$$

Le tableau 1.4 résume les différentes expressions de l'écart-type des variations des vitesses suivant les trois modèles d'analyse des vents.

Tableau 1.4: expressions de l'écart-type des variations des vitesses suivant les trois modèles d'analyse des vents [57].

Distributions	$\sigma(U)$	$Var(U)$
Weibull	$c \sqrt{\left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right]}$	$c^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right]$
Hybride de Weibull	$c \sqrt{(1 - F_0) \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right]}$	$(1 - F_0) c^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right]$
Rayleigh	$0,4632c$	$0,2146c^2$

6.5.3 Facteur de puissance et indice de variation du vent

Le facteur de puissance et l'indice de variation (indice de turbulence) du vent sont des paramètres utiles à la caractérisation d'un site du point de vue éolien.

— Le facteur de puissance du vent est donné par le rapport entre la moyenne de la vitesse cubique et la vitesse moyenne au cube.

$$R_p = \frac{\overline{U^3}}{\bar{U}^3} = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right)}{\Gamma^3\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (1.33)$$

— L'indice de variation de la vitesse (indice de turbulence) du vent est le rapport entre l'écart-type de la fluctuation de la vitesse $\sigma(U)$ et le module moyen de cette vitesse $\bar{U}$. Il caractérise le degré de turbulence du vent pendant une durée déterminée [57 ; 58].

$$I_v = \frac{\sigma(U)}{\bar{U}} = \left(\frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)}{\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)} - 1 \right)^{1/2} \quad (1.34)$$

6.5.4. La rose des vents

L'énergie éolienne étant une énergie renouvelable qui a pour origine le vent, il est plus judicieux de déterminer les caractéristiques importantes du vent (vitesse moyenne et direction dominante) avant l'installation d'un site. L'un des outils appropriés pour la détermination de ces dernières est la rose des vents. C'est un diagramme circulaire concentrique obtenu à partir des vitesses de vent, de leur fréquence et de leur direction. Elle est déterminante dans la localisation de sites. Cependant, les informations disponibles sur la rose des vents sont [68] :

- La fréquence du vent, c'est-à-dire le pourcentage du temps pendant lequel le vent souffle dans une direction ;
- La vitesse moyenne du vent multipliée par sa fréquence.

6.6. Caractérisation du potentiel énergétique éolien

Tenant compte de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, l'énergie disponible subit une succession de pertes en cascades, jusqu'à la sortie de la machine (limite de Betz, seuils machine et pertes de conversion). En effet, seule une partie de la puissance éolienne disponible sur un site donné, appelée puissance utile est réellement obtenue en fin de processus [57].

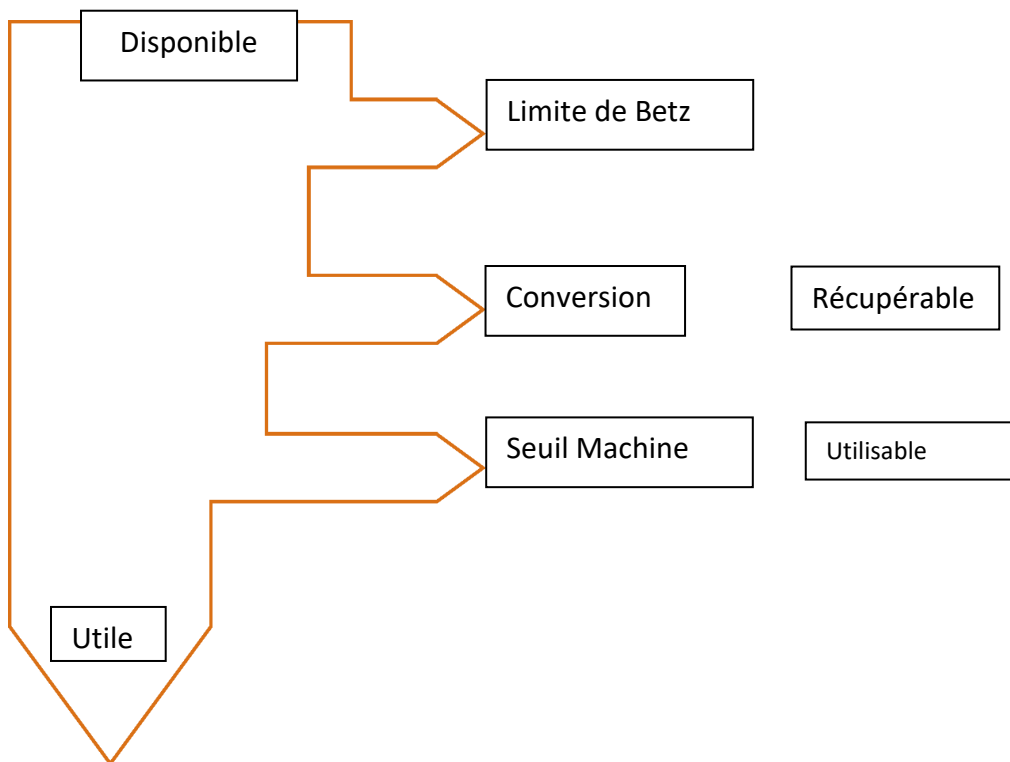


Figure 1. 8: Représentation schématique des déprédations successives de l'énergie éolienne avant l'utilisation [58].

6.6.1. Densité de puissance moyenne du vent

Le calcul de la densité de puissance du vent sur un site donné permet de faire une meilleure caractérisation de la ressource éolienne disponible [11]. La puissance du vent disponible sur site par unité de surface est donnée par l'expression suivante :

$$P(U) = \frac{1}{2} \rho U^3 \quad (1.35)$$

La densité de puissance moyenne disponible par unité de surface s'écrit [57 ; 58] :

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \rho \overline{U^3} \quad (1.36)$$

En utilisant l'expression de la vitesse cubique moyenne déterminée grâce à la densité de probabilité de la loi de Weibull, La densité de puissance moyenne disponible par unité de surface est donnée par :

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (1.37)$$

6.6.2. Puissance théorique maximale récupérable (Limite de Betz)

Une éolienne est un dispositif qui convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Une partie de cette énergie est inévitablement perdue lors de cette conversion du fait que la vitesse en aval du rotor n'est jamais nulle.

Ainsi, selon Betz, la puissance maximale récupérable par une éolienne est égale au 16/27 de la puissance moyenne du vent en amont de l'éolienne [68].

$$P_{\text{récupérable}} = \frac{16}{27} \bar{P} \quad (1.38)$$

Le vent est une source intermittente. Étant donné qu'une éolienne fonctionne grâce à la force du vent, trois vitesses sont essentielles pour son fonctionnement. Ce sont :

- La vitesse de démarrage U_D : c'est la vitesse d'amorçage;
- La vitesse nominale U_N : Au voisinage de cette vitesse, la puissance délivrée par l'éolienne croît suivant une loi de puissance cubique jusqu'à atteindre un seuil.
- La vitesse de coupure U_C : cette vitesse est de 25 m.s^{-1} pour les éoliennes classiques. Au-delà de cette vitesse, l'éolienne se met en drapeau ou se désaccouple pour raison de sécurité [69].

Soit

$$\overline{P_{récupérable}} = \begin{cases} 0 & \text{pour } U < U_D \\ \frac{1}{2} \rho S \int_{U_D}^{U_N} U^3 f(U) dU & \text{pour } U_D \leq U < U_N \\ \frac{1}{2} \rho S \int_{U_N}^{U_C} U_N^3 f(U) dU & \text{pour } U_N \leq U \leq U_C \\ 0 & \text{pour } U > U_C \end{cases} \quad (1.39)$$

avec :

S : la surface balayée par le rotor ($S = \pi D^2/4$;

D : le diamètre du rotor) ;

ρ : la masse volumique de l'air.

6.6.3. Puissance éolienne moyenne utile

La puissance moyenne utile d'une éolienne est égale au produit du coefficient de puissance de l'éolienne (η) par la puissance moyenne récupérable entre sa vitesse d'amorçage et sa vitesse de coupure [70].

$$\overline{P_{Utile}} = \eta \times \overline{P_{récupérable}} \quad (1.40)$$

où

$$\eta = \frac{P_N}{P_{Cal}} \quad (1.41)$$

avec

$$P_N = \frac{1}{2} \rho S (U_N)^3 \quad (1.42)$$

P_{Cal} étant la puissance réellement obtenue à la vitesse nominale.

6.6.4. Densité énergétique moyenne disponible

Le potentiel énergétique éolien moyen disponible (Wh) pendant une période t (le temps de fonctionnement) est obtenue par la relation suivante [58] :

$$\bar{E} = t * \bar{P} \quad (1.43)$$

En utilisant la densité de puissance moyenne en fonction des deux paramètres de Weibull, on a l'équation sous la forme suivante [70] :

$$E = \frac{1}{2} * \rho * c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) * t \quad (1.44)$$

$t = 365 \times 24h$ pour la période d'une année de fonctionnement de l'éolienne.

7. Mise en œuvre des paramètres définis pour caractériser un site : Cas de la région de N'Guigmi

N'Guigmi est située à 14°15'10" nord et 13°06'39" est, à environ 140 km au nord-est de Diffa et 1493 km à l'est de Niamey, capitale du Niger. La ville de N'Guigmi se trouve sur l'ancien rivage du lac Tchad et fait frontière avec le Tchad et le Nigeria. La région est caractérisée par un climat désertique chaud à longue saison sèche avec des températures très élevées et moins de 200 mm de pluies concentrées sur 3 mois en été, typique de la zone saharo-sahélienne entre le Sahara et le Sahel. La température moyenne journalière est comprise entre 29°C et 30°C avec une température moyenne maximale de 38°C et une température moyenne minimale de 21°C.

Les paramètres météorologiques étudiés sont : la vitesse et la direction de vent, la température de l'air, l'humidité relative de l'air, la pression atmosphérique et l'insolation recueillis auprès de la direction nationale de la météorologie (DNM). Ces données couvrent une période de dix (10) ans, notamment de 2010 à 2019 et sont mesurées à 10 mètres d'altitude à un pas de 3h.

7.1. Caractéristiques du vent à 10 mètres du sol

7.1.1. Variation à l'échelle annuelle et interannuelle

Les vitesses moyennes annuelles à 10 mètres du sol, les écarts-types et les coefficients des variations interannuelles sont calculées sur la période 2010-2019, à partir des vitesses de vent reçues de la DMN. Les résultats sont présentés dans le tableau 1.5.

Tableau 1.5: Moyennes annuelles, écart-type et coefficients des variations interannuelles de la vitesse moyenne du vent à 10 mètres du sol.

Mois / Années	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Moy mensuelle
Janv.	4,93	4,92	6,58	5,41	6,07	7,12	6,30	5,75	7,85	5,65	6,06
Févr.	4,47	5,34	5,38	5,24	6,12	5,92	5,57	7,71	6,07	6,45	5,83
mars	5,75	6,56	6,76	5,07	5,22	6,43	4,45	6,17	5,46	6,30	5,82
avril	4,66	5,88	4,84	5,64	4,30	5,92	4,08	5,95	5,13	5,24	5,16
mai	4,71	4,95	4,93	5,16	4,93	5,54	4,78	5,17	4,80	4,51	4,95
juin	4,33	4,35	4,66	4,91	4,56	4,60	4,67	4,98	4,37	4,36	4,58
juillet	3,86	5,09	4,73	4,69	4,98	4,80	4,50	4,78	5,42	5,20	4,80
août	3,76	4,67	4,60	4,31	4,85	4,34	4,42	4,60	4,65	4,76	4,50
sept	3,67	4,38	3,89	4,13	4,20	4,23	4,59	4,51	5,03	4,61	4,32
Oct.	4,12	5,97	4,57	4,87	5,06	5,07	5,20	5,79	5,03	5,56	5,13
Nov.	4,46	5,85	5,31	4,41	6,19	5,70	6,91	5,90	5,87	5,01	5,56
Déc.	4,97	6,76	6,61	6,13	6,15	6,40	7,14	6,13	6,42	6,80	6,35
Moy Annuelle	4,47	5,39	5,24	5,00	5,22	5,51	5,22	5,62	5,51	5,37	
Écart- type	0,57	0,77	0,89	0,55	0,70	0,87	0,99	0,85	0,91	0,77	
Coef de var	0,13	0,14	0,17	0,11	0,13	0,16	0,19	0,15	0,17	0,14	

NB : les données coloriées dans le tableau 1.5 représentent pour chaque année :

- Les moyennes maximales en rouge
- Les moyennes minimales en vert
- Les moyennes maximales en second pour le jaune

L'analyse du tableau 1.5 révèle que durant les 10 années d'observations :

— L'année 2010 et 2013 présentent les plus faibles valeurs d'écart-type, respectivement (0,57 et 0,55) et de coefficient de variation respectivement de (0,13) et (0,11). Ces valeurs permettent d'affirmer que les vitesses moyennes mensuelles sont peu dispersées autour de la moyenne annuelle ; donc le vent est stable.

— L'année 2016 a enregistré une vitesse moyenne annuelle de $5,22 \text{ m.s}^{-1}$ avec un écart-type important de l'ordre de $0,99 \text{ m.s}^{-1}$ et un

coefficient de variation de 0,19. Ces résultats permettent de conclure que, les vitesses moyennes mensuelles sont assez dispersées autour de la moyenne annuelle ; c'est donc une année durant laquelle on note une importante fluctuation des régimes du vent.

Au vu des valeurs du coefficient de variation, le vent présente un régime presque régulier sur la période 2010-2019, On peut donc conclure que le vent est pratiquement stable sur cette période.

7.1.2. Variation saisonnière de la vitesse moyenne du vent

La courbe de variation saisonnière de la vitesse moyenne du vent à 10 m du sol est représentée à la figure 1.9 pour différentes années.

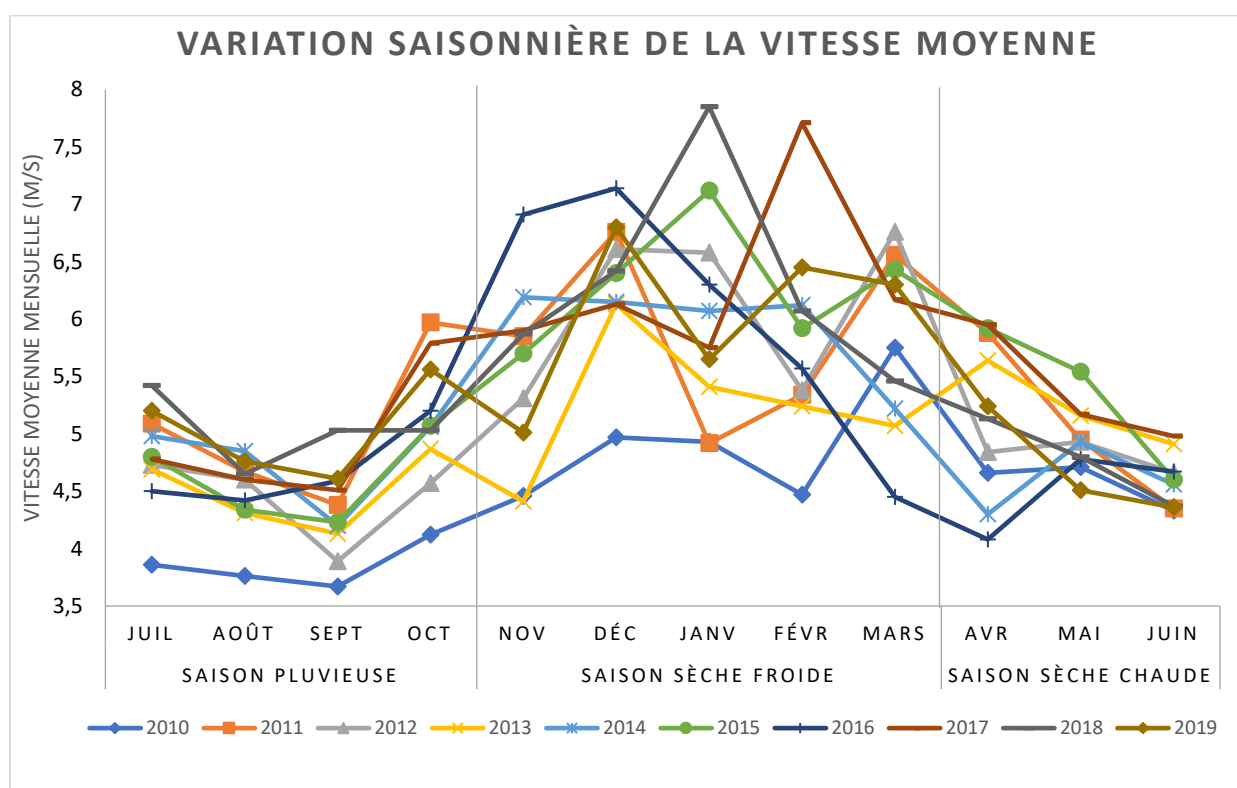


Figure 1. 9: Variation de la vitesse moyenne sur la période 2010 - 2019

Le climat du Niger est caractérisé par deux saisons : une saison sèche et une saison pluvieuse. La saison sèche se subdivise en saison sèche froide et en saison sèche chaude. Sur l'année, les saisons sont réparties ainsi qu'il suit :

- La saison sèche froide qui s'étend de Novembre (11^e mois) jusqu'en Mars (3^e mois) ;
- La saison sèche chaude qui couvre les mois d'Avril (4^e mois) jusqu'en Juin (7^e mois) ;

— La saison pluvieuse qui débute en juillet (8^e mois) et prend fin en Octobre (10^e mois).

L'observation de cette figure permet de dire que la saison sèche froide, qui est la plus longue des trois, est celle qui a les vitesses les plus grandes pour toutes les années étudiées. Les vitesses maximales ont des moyennes avoisinant les 8 m.s^{-1} .

La saison chaude (Avril-Juin), est caractérisée par des vents faibles ($4,58 - 5,16 \text{ m.s}^{-1}$), tandis que la saison pluvieuse débute avec des vents modérés et finit avec des vents faibles ($4,32 - 5,56 \text{ m.s}^{-1}$). Cela résulte du fait que pendant la saison pluvieuse le vent est très fluctueux et instable avec plus de vents faibles.

De manière générale, l'analyse de la figure 1.9 permet d'affirmer que durant les 10 ans d'observations sur le site de l'étude, la vitesse moyenne du vent fluctue en fonction des saisons avec une moyenne maximale en saison froide due à l'Harmattan qui souffle durant cette période.

7.1.3. Étude de la direction du vent (rose des vents)

Dans le but de connaître les différentes directions du vent, en particulier celles des vents dominants, des études fréquentielles des vitesses et directions du vent ont été menées. Celles qui portent sur les vitesses moyennes mensuelles vont permettre de construire la rose des vents.

La rose des vents a été réalisée en utilisant les données trihoraires des vitesses et directions des vents sur une période de 10 ans (2010-2019) et est illustrée à la figure suivante.

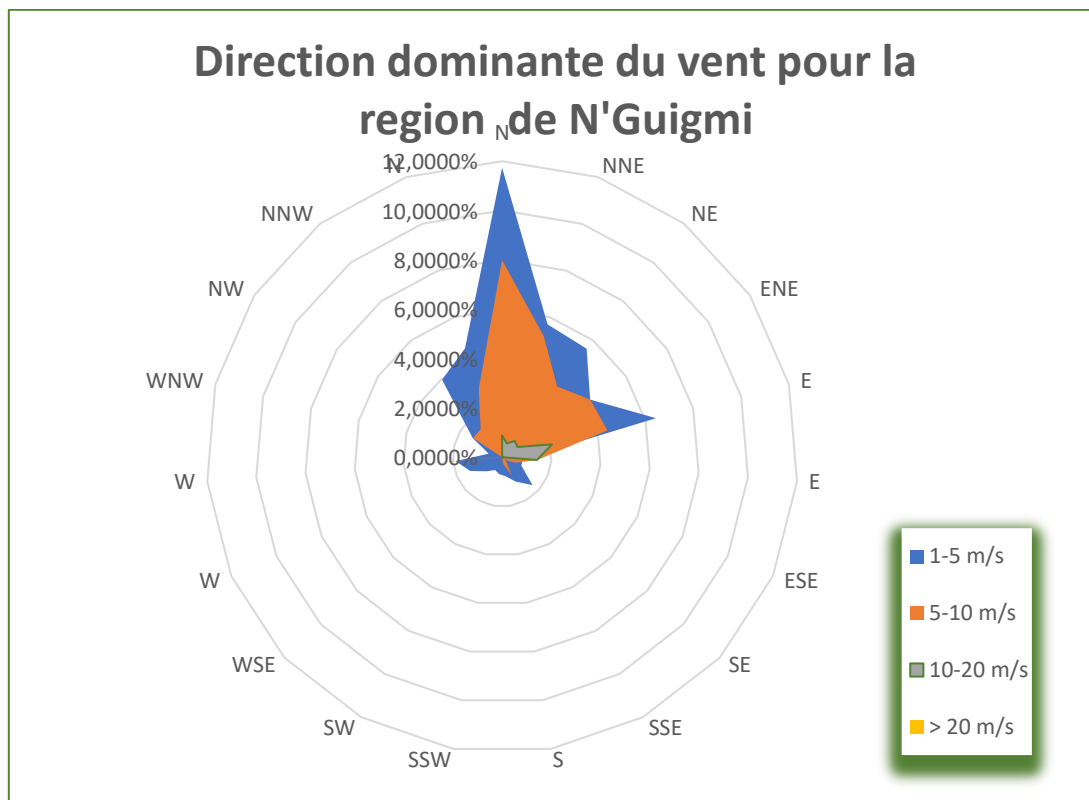


Figure 1. 10: Rose des vents sur la période d'observation (2010 - 2019)

L'analyse de la figure 1.10 permet de dire que pour l'ensemble des observations, le vent souffle dans deux directions de prédominance notamment le Nord et L'Est. Ceci peut se comprendre du fait que ces deux directions font face à la zone désertique du pays. Les vents en provenance de ces deux directions ont des valeurs comprises entre 1 et 10 $m.s^{-1}$. On remarque aussi des vents forts venant de l'Est avec des vitesses allant de 10 à 20 $m.s^{-1}$.

7.1.4. Modélisation de la vitesse du vent

7.1.4.1. Distribution statistique de la vitesse du vent

Pour modéliser la distribution statistique du vent sur le site d'étude, après analyse de dix années d'observations de la vitesse du vent, deux années sont sélectionnées. Il s'agit de l'année 2010 qui présente la plus faible vitesse moyenne annuelle (4,47 $m.s^{-1}$) et l'année 2017 avec une vitesse moyenne annuelle de 5,62 $m.s^{-1}$ qui est la plus grande valeur enregistrée sur les dix ans.

Les tableaux 1.6 et 1.7 ci-dessous donnent respectivement les fréquences absolues et cumulées en fonction des classes de vent pour les observations des années 2010 et 2017.

Tableau 1. 6: Fréquences absolues et cumulées pour les vents observés en 2010

Classes	Effectifs	Fréquences	Fréquences cumulées
U ∈ [0-1[	204	6,99%	6,99%
U ∈ [1-2[	287	9,83%	16,82%
U ∈ [2-3[	288	9,86%	26,68%
U ∈ [3-4[	373	12,77%	39,45%
U ∈ [4-5[	404	13,84%	53,29%
U ∈ [5-6[	390	13,36%	66,64%
U ∈ [6-7[	346	11,85%	78,49%
U ∈ [7-8[	204	6,99%	85,48%
U ∈ [8-9[	155	5,31%	90,79%
U ∈ [9-10[	116	3,97%	94,76%
U ∈ [10-11[	58	1,99%	96,75%
U ∈ [11-12[	46	1,58%	98,32%
U ∈ [12-13[	22	0,75%	99,08%
U ∈ [13-14[	12	0,41%	99,49%
U ∈ [15-16[	6	0,21%	99,69%
U ∈ [16-17[	5	0,17%	99,86%
U ∈ [17-18[	2	0,07%	99,93%
U ∈ [18-19[	2	0,07%	100,00%
Total	2920	100,00%	100,00%

Tableau 1.7: Fréquences absolues et cumulées pour les vents observés en 2017

Classes	Effectifs	Fréquences	Fréquences cumulées
U ∈ [0-1[	53	1,82%	1,82%
U ∈ [1-2[	91	3,12%	4,93%
U ∈ [2-3[	200	6,85%	11,78%
U ∈ [3-4[	411	14,08%	25,86%
U ∈ [4-5[	512	17,53%	43,39%
U ∈ [5-6[	377	12,91%	56,30%
U ∈ [6-7[	315	10,79%	67,09%
U ∈ [7-8[	266	9,11%	76,20%
U ∈ [8-9[	211	7,23%	83,42%
U ∈ [9-10[	146	5,00%	88,42%
U ∈ [10-11[	116	3,97%	92,40%
U ∈ [11-12[	76	2,60%	95,00%
U ∈ [12-13[	51	1,75%	96,75%
U ∈ [13-14[	41	1,40%	98,15%
U ∈ [15-16[	23	0,79%	98,94%
U ∈ [16-17[	13	0,45%	99,38%
U ∈ [17-18[	10	0,34%	99,73%

U ∈ [18-19[	4	0,14%	99,86%
U ∈ [19-20[	4	0,14%	100,00%
Total	2920	1	1

L'analyse de ces deux tableaux montre que :

- Pour l'année 2010, plus de 50% des fréquences de vent appartiennent à la classe de vitesse allant de 3 à 7 $m.s^{-1}$. Les vents de vitesses les plus élevées sont de la classe de 4 à 6 $m.s^{-1}$.
- Les fréquences les plus importantes pour l'année 2017 appartiennent aux classes [3 – 4[; [4 – 5[et [5 – 6[$m.s^{-1}$ avec des fréquences respectives 14,08% ; 17,53% et 12,91%. Là également, au moins 60% des fréquences de vent sont de l'intervalle [3 – 8[$m.s^{-1}$

Sachant qu'une éolienne de moyenne puissance (100 kW à 1 MW) peut démarrer à partir des vents ayant une vitesse de l'ordre de 2 $m.s^{-1}$; ces résultats permettent de dire que, l'installation d'un parc éolien est viable sur ce site.

Les figures suivantes présentent les histogrammes des fréquences du vent en fonction des classes de vent respectivement pour les années 2010 et 2017 obtenues à partir des tableaux 1.6 et 1.7.

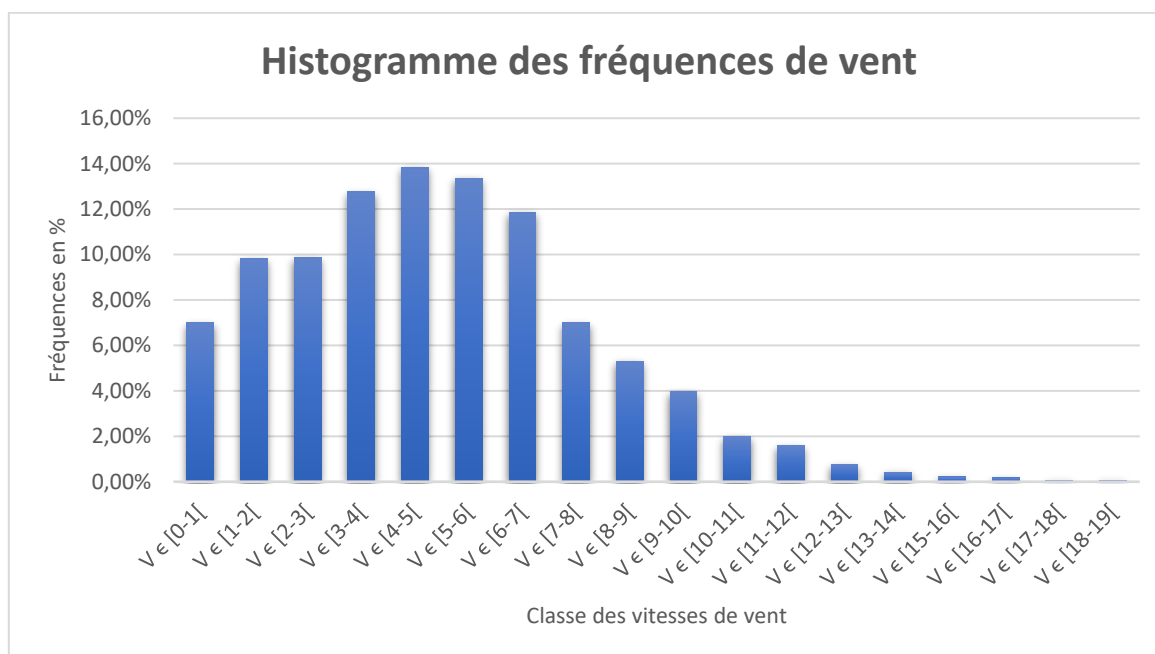


Figure 1. 11: Histogramme des classes des vitesses de vent pour l'année 2010

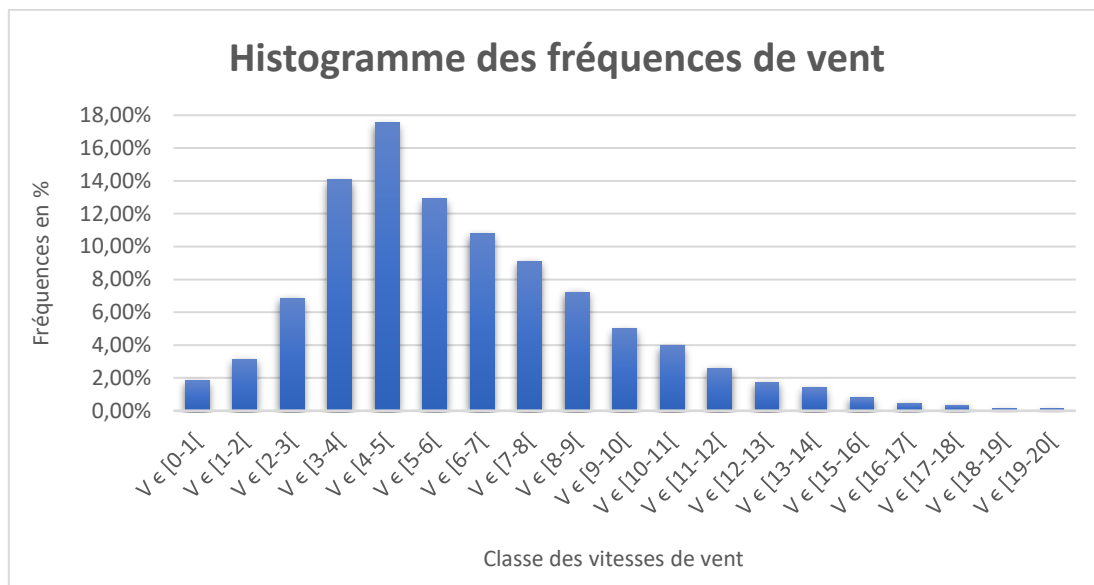


Figure 1. 12: Histogramme des classes des vitesses de vent pour l'année 2017

7.1.4.2. Ajustement par la fonction de Weibull

Les caractéristiques statistiques du vent permettent de connaître la répartition des vitesses du vent sous la forme d'histogrammes de fréquences d'occurrence. Les distributions sont calculées par intervalle de $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Dans la pratique, on assimile ce type d'histogramme à une fonction de densité de probabilité des vitesses. Dans cette approche, la distribution de probabilité de Weibull est à l'heure actuelle le standard pour la représentation statistique de la climatologie des sites éoliens.

Dans cette étude, les paramètres de Weibull sont approximés en utilisant la méthode de H. Mabchour (cf. 5.2.4). Le tableau 1.8 résume les valeurs des paramètres de Weibull calculées pour la période d'étude.

Tableau 1. 8: Valeurs des paramètres de Weibull annuels

Années	Vitesse moyenne en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Facteur de forme k	Facteur d'échelle c en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
2010	4,47	1,77	5,56
2011	5,39	1,90	6,56
2012	5,24	1,88	6,40
2013	5,00	1,85	6,14
2014	5,22	1,88	6,38
2015	5,51	1,92	6,69
2016	5,22	1,88	6,38
2017	5,62	1,93	6,81
2018	5,51	1,92	6,69

2019	5,37	1,90	6,54
------	------	------	------

Le paramètre de forme k , varie entre une valeur de 1,77 obtenue en 2010 et une valeur de 1,93 estimée en 2017. Cette variation de ce paramètre comprise entre 1 et 2, montre que les vents sont dispersés autour de la moyenne. Plus la valeur de k est faible, plus la vitesse du vent est variable tandis qu'une valeur élevée indique une vitesse de vent constante. Ceci montre que l'année 2010 a une variabilité de vent plus prononcée alors qu'en 2017, le vent est plus constant.

Le paramètre d'échelle c , (proportionnel à la vitesse moyenne du vent), varie dans une gamme un peu plus large. La valeur minimale de ce paramètre est de $5,56 \text{ m.s}^{-1}$ obtenue en 2010 et celle maximale est de $6,81 \text{ m.s}^{-1}$ obtenue en 2017. Cette variation du paramètre d'échelle montre l'instabilité de l'atmosphère entre les années ; ce qui peut avoir un impact négatif sur la production et le fonctionnement d'une éolienne d'une année à l'autre.

Les paramètres de Weibull calculés sont utilisés pour représenter la fonction statistique de Weibull en fonction des fréquences et des classes de vent. Les figures ci-dessous, présentent les fréquences de la vitesse du vent et la fonction de distribution statistique de Weibull annuelles obtenues respectivement pour les années 2010 et 2017.

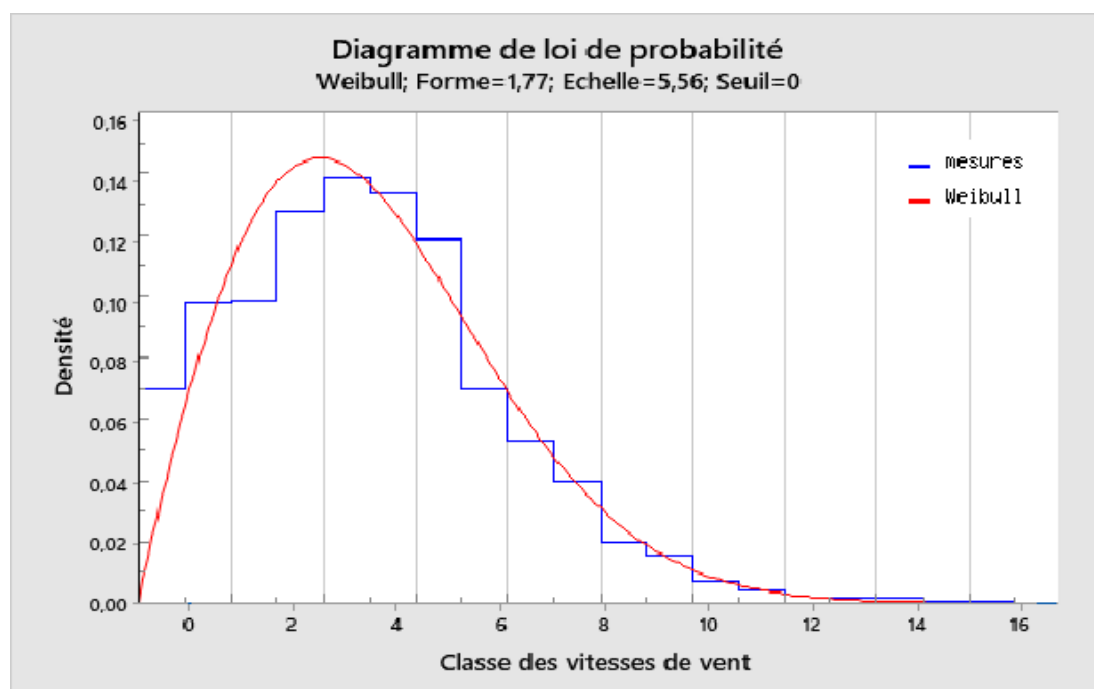


Figure 1. 13: Courbe de Weibull pour l'année 2010

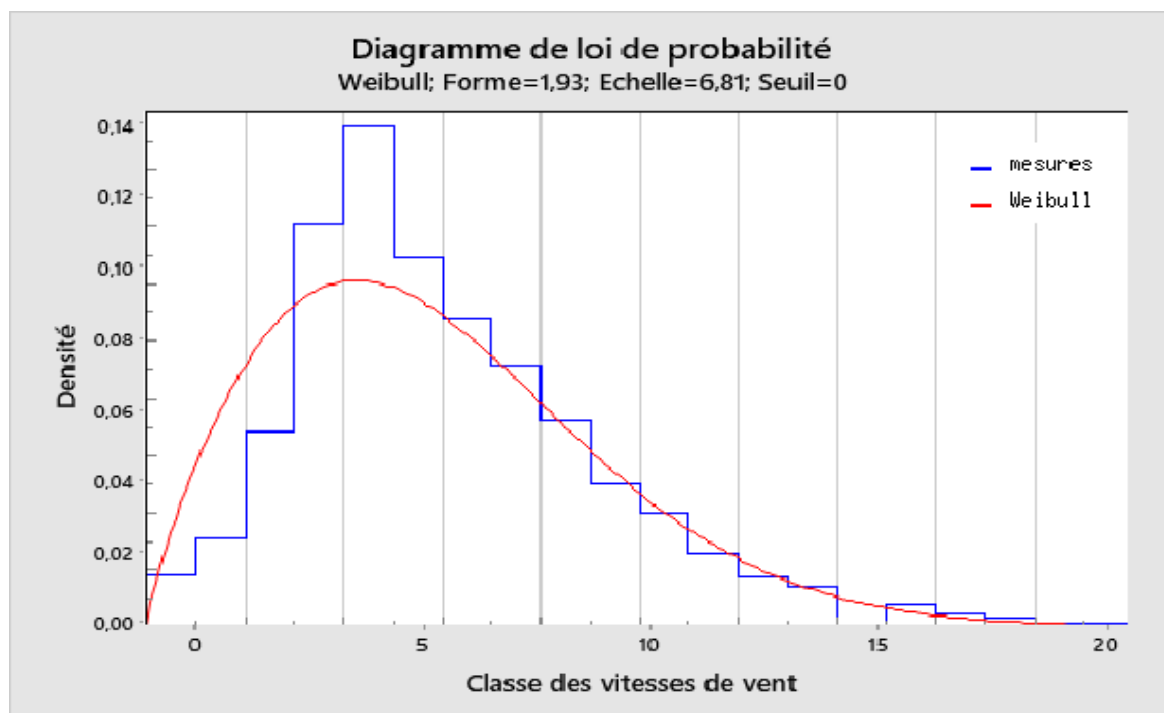


Figure 1.14: Courbe de Weibull pour l'année 2017

L'analyse de ces figures montre que :

- Pour l'année 2010, l'histogramme des fréquences du vent est mal reparti sur la gamme des vitesses et la fonction statistique de Weibull est mal adaptée ;
- L'année 2017 est caractérisée par une distribution classique et bien représentée par une fonction de Weibull (presque gaussienne). Cela permet d'affirmer que pour l'année 2017, la distribution statistique de Weibull représente bien les distributions observées.

7.1.5. Densité de puissance moyenne et d'énergie moyenne annuelle

Sur un site donné, la puissance moyenne disponible est proportionnelle au cube de la vitesse du vent du site. Cette puissance peut être calculée en utilisant les expressions des vitesses en fonction des paramètres de Weibull k et c .

Le tableau 1.9 donne les variations annuelles de la vitesse moyenne du vent, de la puissance moyenne disponible et d'énergie moyenne par unité de surface.

Tableau 1. 9: Estimation de la vitesse moyenne du vent, de la densité de puissance moyenne disponible et d'énergie moyenne.

Années	Vitesse moyenne ($m.s^{-1}$)	Puissance moyenne disponible (W/m^2)	Énergie moyenne (Wh/m^2)
2010	4,47	57,608	504645,483
2011	5,39	101,001	884769,446
2012	5,24	92,801	812938,481
2013	5	80,625	706275,000
2014	5,22	91,743	803665,509
2015	5,51	107,898	945188,910
2016	5,22	91,743	803665,509
2017	5,62	114,490	1002934,954
2018	5,51	107,898	945188,910
2019	5,37	99,881	874956,935

Les résultats de ce tableau montrent une corrélation entre la variation de la vitesse moyenne de vent et celle de la puissance moyenne disponible et de l'énergie moyenne annuelle. La valeur maximale de la vitesse moyenne du vent ($5,62 m.s^{-1}$) est obtenue en 2017, donnant lieu à la densité de puissance de moyenne maximale de $114,490 W/m^2$ et d'énergie maximale de $1002934,954 Wh/m^2$.

Ces résultats prouvent que le site présente un gisement énergétique éolien moyen pour certaines années (2010 et 2013) et suffisamment élevé pour d'autres (2015, 2017 et 2018).

7.2. Résultats d'extrapolation verticale de la vitesse moyenne du vent et des paramètres de Weibull à la hauteur du mât

Le tableau suivant donne les résultats d'extrapolation verticale de la vitesse moyenne annuelle et des paramètres de Weibull, calculés à l'aide des données trihoraires.

Tableau 1 .10: Extrapolation verticale de la vitesse moyenne annuelle du vent et des paramètres de Weibull à 30 m et 50 m d'altitude.

Hauteur Année	Vitesse moyenne en ($m.s^{-1}$)			Facteur d'échelle c en ($m.s^{-1}$)			Facteur de forme k		
	10 m	30 m	50 m	10 m	30 m	50 m	10 m	30 m	50 m
2010	4,47	6,238	7,284	5,56	7,073	7,910	1,766	1,843	1,882
2011	5,39	7,482	8,714	6,56	8,212	9,116	1,900	1,984	2,025
2012	5,24	7,279	8,482	6,40	8,031	8,925	1,880	1,962	2,003
2013	5	6,955	8,109	6,14	7,736	8,613	1,846	1,927	1,967
2014	5,22	7,252	8,451	6,38	8,008	8,901	1,877	1,959	2,000
2015	5,51	7,643	8,900	6,69	8,359	9,271	1,916	2,000	2,042
2016	5,22	7,252	8,451	6,38	8,008	8,901	1,877	1,959	2,000
2017	5,62	7,792	9,070	6,81	8,494	9,414	1,931	2,016	2,058
2018	5,51	7,643	8,900	6,69	8,359	9,271	1,916	2,000	2,042
2019	5,37	7,455	8,683	6,54	8,190	9,093	1,898	1,981	2,022

L'analyse de ce tableau permet de dire que la vitesse moyenne annuelle et les paramètres de Weibull varient avec l'altitude. De façon générale, l'observation de ce tableau permet d'affirmer que plus on monte en altitude, plus les valeurs calculées de vitesse de vent sont grandes ; ce qui confirme l'hypothèse selon laquelle la vitesse du vent croît avec l'altitude.

7.3. Analyse de corrélation entre les différents paramètres météorologiques [86]

L'impact de la variabilité climatique sur les régimes saisonniers de vent a aussi été analysé à partir d'une analyse multidimensionnelle en particulier l'analyse en composantes principales (ACP). La méthode d'ACP utilisée pour cette étude est basée sur l'interprétation du cercle de corrélation de même que les différents facteurs obtenus à la suite du traitement des données. Son objectif est de déterminer les facteurs météorologiques qui influencent la variabilité des régimes éoliens. Le choix des axes principaux tient compte de la réduction du nombre de facteurs. Ce nombre est tel que la somme cumulée des contributions est importante (75 % qui représentent les trois quarts de l'inertie totale). En effet, deux variables sont corrélées lorsque leur coefficient de corrélation est supérieur ou égal à 0,7. De plus au niveau des plans factoriels, des variables ne sont représentatives que lorsqu'elles sont proches de l'extrémité de ces facteurs. Lorsque deux variables sont corrélées, la variation de l'une entraîne celle de l'autre.

L'analyse multivariée a été réalisée à partir des données recueillies à la station météorologique de N'Guigmi sur la période 2010-2019. Les variables utilisées sont la température, la pression, l'insolation, la vitesse du vent et l'humidité relative. Les différents traitements ont été réalisés à partir du logiciel Excel 2019 de la suite office.

L'analyse des paramètres météorologiques nous amène à déterminer les moyennes mensuelles et interannuelles de la température, l'humidité, la pression, l'insolation et la vitesse du vent. Le tableau 1.11 nous donne les moyennes mensuelles de ces paramètres.

Tableau 1.11: Moyennes mensuelles des paramètres métrologiques utilisés dans l'étude

Paramètre Période	Température (°C)	Humidité (%)	Pression (mbar)	Insolation (wh. s ⁻²)	Vent (m. s ⁻¹)
Jan.	21,69	24,41	980,96	9,49	6,06
Fév.	25,64	19,84	978,22	9,62	5,83
Mars	29,66	18,37	976,88	8,78	5,82
Avril	33,09	19,89	975,50	8,78	5,16
Mai	34,60	30,31	971,13	9,09	4,95
Juin	34,39	42,96	973,20	8,54	4,58
Juil.	32,07	55,84	973,81	8,07	4,80
Août	29,94	66,76	977,17	7,55	4,50
Sept.	31,46	56,02	977,04	8,43	4,32
Oct.	31,12	34,69	975,98	9,53	5,13
Nov.	27,19	25,69	977,57	10,17	5,56
Déc.	22,23	27,99	980,47	9,48	6,35

Les variations interannuelles sont représentées sur les figures 1.15 à 1.19. Ces variations sont accompagnées de leur courbe de tendance afin de visualiser leur progression ou régression. L'analyse des données recueillies souligne la tendance générale de la variation de la vitesse des vents et des autres paramètres météorologiques étudiés.

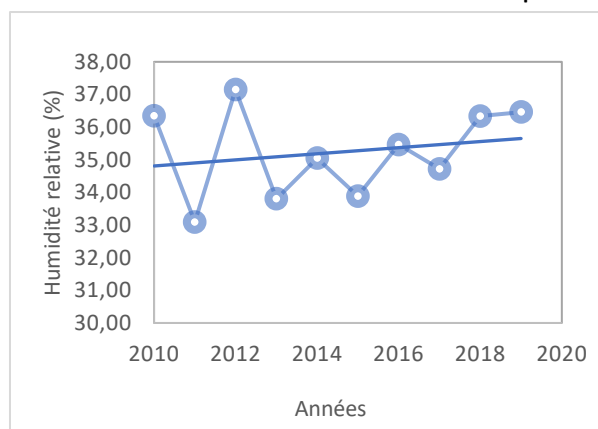


Figure 1. 16: Variation interannuelle de l'humidité relative

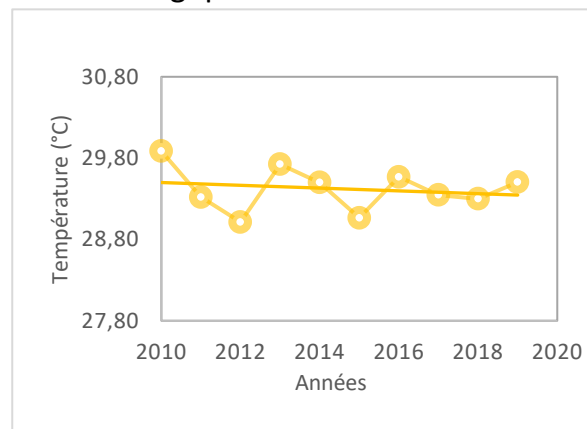


Figure 1 15: Variation interannuelle de la température

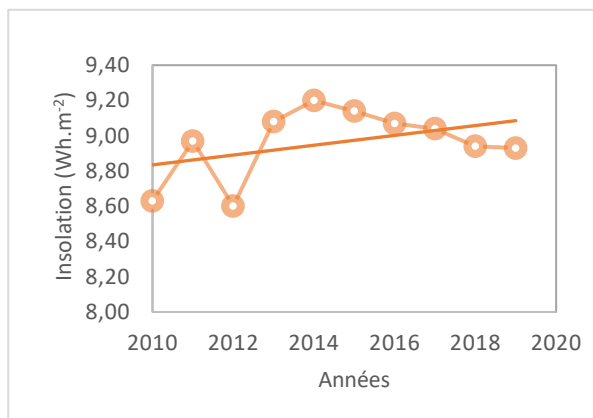


Figure 1.17: Variation interannuelle de l'insolation

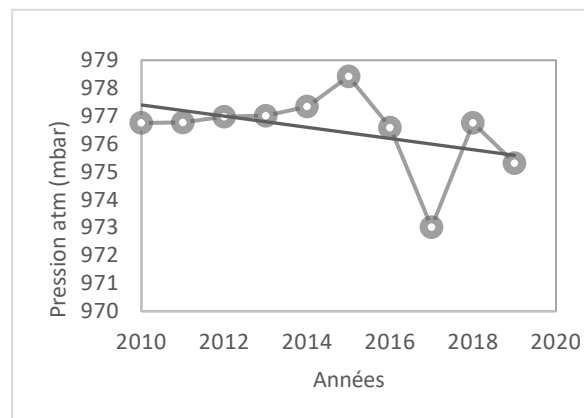


Figure 1.18: Variation interannuelle de la pression

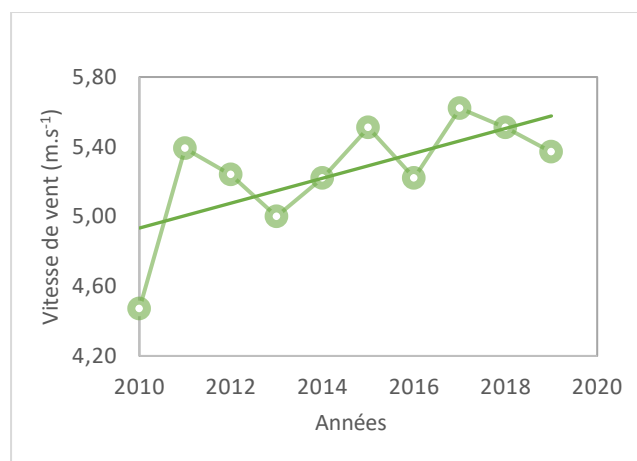


Figure 1.19: Variation interannuelle de la vitesse de vent

Commentaire des courbes de variation :

La figure 1.15 nous renseigne sur la variation de la température sur les dix ans. Sur la période d'étude, les années avec les plus hautes températures restent l'année 2010 et 2013. L'étude du tableau 1.11 nous montre une hausse remarquée de la température pendant les mois de mars, avril et mai et une baisse sur les mois de décembre et de janvier. Ces températures moyennes mensuelles varient entre 21,69 °C (Jan) et 34,60 °C (Mai).

L'analyse de la courbe de l'humidité relative (figure 1.16) nous informe du faible niveau de ce paramètre dans cette zone. Ces valeurs reflètent parfaitement la particularité de la région. Les valeurs basses de l'humidité relative se justifient par le fait que la zone de N'Guigmi est une zone désertique, donc avec beaucoup de soleil et de vent.

Les courbes de variation interannuelles de la pression atmosphérique (figure 1.17) et de l'insolation (figure 1.18) indiquent leur valeur maximale sur l'année 2015 pour les deux paramètres météorologiques. Les valeurs moyennes minimales de l'insolation

sont observées en 2012, année au cours de laquelle on a les températures moyennes les plus basses enregistrées et l'humidité relative de l'air la plus élevée, ce qui est parfaitement cohérent. Les vitesses moyennes maximales sont enregistrées en 2017, qui correspondent à l'année avec les pressions les plus basses, une insolation assez élevée et des valeurs de températures et de l'humidité relative proche de la moyenne. On remarque dans ce cas aussi une concordance des résultats puisque le vent étant de l'air en mouvement, plus il y'a du soleil (donc de la chaleur), plus l'air est moins dense et donc léger, ce qui facilite son mouvement. La figure 1.19 montre une courbe de croissance ascendante des vitesses de vent sur la période d'observations. La vitesse moyenne maximale correspond à l'année 2017, où on observe une température moyenne, une valeur de l'humidité relative basse, un ensoleillement assez élevé et la plus basse valeur de la pression atmosphérique.

7.4. Application de la méthode

Dans le cas de notre étude, nous avons utilisé Excel de la Suite Office pour l'analyse de nos paramètres. L'outil d'étude statistique XLSTAT, qui va avec Excel, nous a permis de mener l'analyse en composantes principales. Cet outil de data mining permet d'explorer un jeu de données multidimensionnelles constituées de variables quantitatives afin d'étudier et de visualiser les corrélations entre les variables, dans le but de limiter éventuellement le nombre de variables à mesurer par la suite. Nos variables quantitatives d'entrée sont la pression, la température maximale et minimale, l'ensoleillement et l'humidité relative maximale et minimale, tandis que le libellé des observations est la vitesse du vent. Le type d'ACP exécuté est la corrélation de Pearson et toutes les variables sont les moyennes mensuelles des données trihoraires collectées de 2010 à 2019.

L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode très efficace pour l'analyse de données quantitatives (continues ou discrètes) sous forme de tableaux comportant M observations et N variables. C'est une méthode descriptive qui permet une représentation simplifiée d'une série de variables inter corrélées. Son application aux 6 variables a donné les résultats constituant notre base d'interprétation.

Le premier résultat intéressant à identifier par suite d'une analyse en composantes principales est la matrice des corrélations qui permet d'analyser les relations qui existent entre les différentes variables retenues. Cette matrice est représentée sur le tableau 1.12.

Tableau 1.12: Matrice de corrélation (Pearson) entre les variables analysées

Variables	Pression	Insolation	Temp Max	Temp Min	Hum Max	Hum Min
Pression	1					
Insolation	0,189	1				
Temp Max	-0,569	-0,163	1			
Temp Min	-0,561	-0,521	0,844	1		
Hum Max	-0,190	-0,623	0,107	0,555	1	
Hum Min	-0,132	-0,683	-0,002	0,492	0,959	1

Le tableau 1.12 présente la matrice de corrélation exprimant les différentes corrélations entre les variables analysées. L'objectif de cette analyse est de vérifier la redondance de ces variables. L'interprétation de la matrice permet de constater que l'ensemble des valeurs de corrélation est relativement faible. En effet, la plupart des coefficients de corrélation sont inférieurs à 0,70. Il s'en suit que les variables analysées ne sont pas fortement corrélées entre elles. Cela réduit considérablement la redondance de l'information et démontre la pertinence du choix de ces variables pour l'étude.

La diagonalisation de la matrice de corrélation donne les valeurs propres présentées dans le tableau 1.13. Chaque facteur est caractérisé par une valeur propre, une part de la variance totale (% de variabilité), et une part de la variance cumulée (% cumulé).

Tableau 1.13: les valeurs propres des axes principaux.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Valeur propre	3,274	1,723	0,519	0,427	0,039	0,017
Variabilité (%)	54,575	28,709	8,653	7,124	0,658	0,282
% cumulé	54,575	83,284	91,936	99,060	99,718	100,000

À travers le tableau 1.13, on remarque que le premier axe (F1) permet d'expliquer (54,575%) de la variance totale du nuage de points et le second axe (F2) permet d'expliquer (28,709%) de la variance totale. En projetant donc chaque individu sur un plan (F1, F2) on conserve 83,284% de la variance totale. En effet, 75 % représentent la valeur de référence acceptable dans le cadre d'une étude ACP. Les deux premiers facteurs contiennent donc l'essentiel des informations relatives aux matrices des données.

L'analyse factorielle des correspondances a permis une description des relations entre le régime des vents et les autres paramètres météorologiques. Des analyses de

variance ont permis de juger de la signification des relations mises en évidence par l'analyse factorielle.

Tableau 1.14: Corrélations entre les variables et les facteurs

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Pression	-0,536	-0,590	0,588	0,138	0,000	0,000
Insolation	-0,754	0,328	-0,165	0,544	-0,027	0,001
Temp Max	0,555	0,769	0,287	0,097	0,066	-0,068
Temp Min	0,886	0,381	0,213	0,100	-0,097	0,074
Hum Max	0,830	-0,465	-0,096	0,263	0,126	0,038
Hum Min	0,798	-0,561	-0,097	0,156	-0,095	-0,073

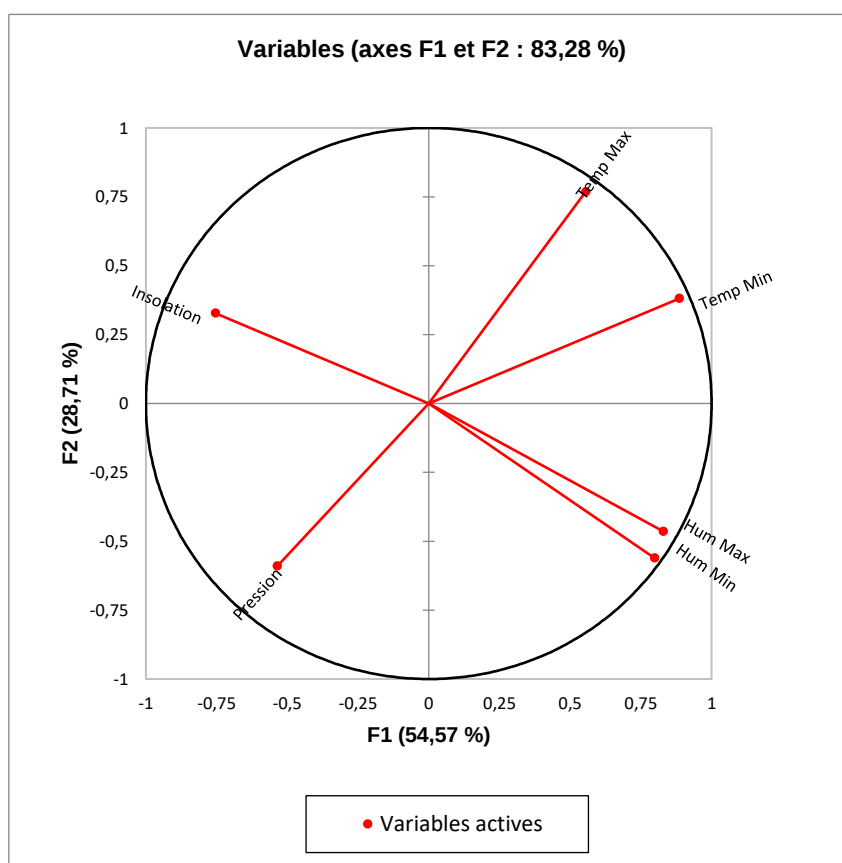


Figure 1. 20: Espace des variables des plans factoriels F1-F2

L'analyse dans l'espace des variables a été réalisée dans les plans factoriels F1-F2. Pour la lecture du cercle de corrélation, une variable est corrélée avec l'élément de l'analyse lorsqu'elle décrit un angle aigu avec l'axe principal. Si cet angle est droit, c'est que la variable est indépendante. Si l'angle est obtus, alors la variable est anticorrélée avec l'élément de l'analyse. Le tableau 1.14 et la figure 1.20 nous montrent des valeurs positives de corrélations très élevées de la température maximale et minimale avec les

composantes principales F1 et F2. La variable humidité est fortement corrélée avec l'axe F1 et négativement corrélée avec l'axe F2. La pression est négativement corrélée avec les deux axes principaux et l'insolation est négativement corrélée avec F1 et positivement avec F2. Les résultats obtenus révèlent que la température et l'humidité relative sont les facteurs qui influencent le plus la variation de vitesse de vent. En effet, la température reste le paramètre météorologique le plus influent dans la variation de la vitesse du vent du fait de sa corrélation très forte avec les facteurs F1 et F2. Ensuite vient l'humidité relative de l'air, l'insolation et enfin la pression (Tableau 1.14).

On peut observer que c'est l'effet conjugué de la température de l'air et de l'humidité relative qui agit sur la vitesse du vent. La température, du fait de sa corrélation positive avec les deux composantes principales reste le paramètre le plus influent, tandis que l'humidité, avec une corrélation très positive avec la composante principale F1 et négative avec la composante F2 influe également.

Un regard sur les valeurs consignées dans le tableau 1.14 nous permet d'établir un classement en termes d'influence de chacun des quatre paramètres étudiés sur la variation de la vitesse du vent. Ainsi, on voit clairement que le paramètre le plus influent reste la température, suivi de l'humidité relative, de l'insolation et enfin de la pression atmosphérique. Ces résultats nous amènent à affirmer que pour caractériser efficacement un site éolien, il serait préférable de connaître les paramètres météorologiques qui régissent la zone. Les seuls paramètres topographiques et d'obstacles ne permettent pas de définir réellement un site éolien.

Ces résultats sont très satisfaisants, puisque le vent est de l'air en circulation, sous une température élevée, sa densité diminue, et sa circulation est facilitée. En revanche, avec l'humidité, il devient plus lourd, et le vent circule moins vite. Nous pouvons sans doute affirmer, sur la base de l'observation des variations de température cumulées à celles de l'humidité, qu'il est possible de prédire le régime des vents en connaissant ces paramètres.

Finalement, les conclusions de cette étude montrent que l'analyse des paramètres météorologiques nous permet d'anticiper la variation du vent ou de prédire son comportement dans le temps et par conséquent, de déterminer un site pouvant abriter un parc éolien. Dorénavant avec ces résultats, connaître la variation de la température, de l'humidité et de l'ensoleillement dans une zone permettra de déterminer la tendance de la variation de la vitesse du vent et donc de pouvoir décider de la viabilité ou non d'un site éolien.

Les résultats obtenus peuvent être mis en relation avec des travaux d'autres chercheurs. D'après les résultats des travaux A.A. Koukpedji et al [71], AKRABOU Omar et al [72], la variabilité des paramètres météorologiques, notamment la température, l'humidité et la pression influent beaucoup sur les régimes éoliens saisonniers. Amani M. Kouassi et al [73] ont montré que la fluctuation des paramètres climatiques comme la température ou l'humidité relative se fait ressentir sur d'autres paramètres, météorologiques, notamment sur la pluviométrie.

8. Conclusion

La production d'électricité par l'énergie éolienne intéresse de plus en plus les pays, afin de produire une énergie propre et durable. L'état avancé des recherches dans le domaine éolien montre une volonté de développement des éoliennes toujours plus puissantes pour capter au mieux la puissance disponible dans le vent.

Ce chapitre présente l'état de l'art de l'énergie éolienne. De ce fait, des notions au sujet de la technologie des éoliennes ont été abordées. Les méthodes de calculs des paramètres, d'évaluation et de caractérisation de potentiel éolien sont mises en avant pour une application sur un site concret.

Une analyse de la distribution de l'humidité relative, de la température, de la pression et de l'insolation est aussi effectuée. Nous nous sommes intéressés à l'évolution temporelle de ces différents paramètres météorologiques et surtout leur implication dans la variabilité de la vitesse horizontale du vent. En conclusion, on remarque une implication manifeste des paramètres météorologiques sur la variabilité de la vitesse du vent.

CHAPITRE 2 : LES BASES SCIENTIFIQUES POUR LE CHOIX DU CONVERGENT

1. Introduction

Dans ce chapitre, il sera rappelé les notions essentielles sur l'écoulement des fluides compressibles. Un tour d'horizon des connaissances des propriétés des fluides compressibles et des lois de leur écoulement sera fait pour justifier le choix du convergent et proposer un schéma du modèle mécanique du nouveau dispositif éolien. Il est important de rappeler comment les éléments qui y seront abordés influencent la puissance récupérable et surtout les choix qui seront opérés notamment dans le chapitre suivant.

La puissance disponible au niveau d'un système éolien classique est donnée par l'expression :

$$\mathcal{P}_{\text{récupérable}} = 1/2 \rho S U^3 \quad (2.1)$$

qui est obtenue à partir de l'expression équivalente :

$$\mathcal{P}_{\text{récupérable}} = \frac{E_c}{t} = 1/2 \dot{m} U^2 \quad (2.2)$$

La limite de Betz montre que, le maximum récupérable représente une fraction de 16/27 de ladite puissance. Nonobstant cette limite, il est aisé de comprendre que sous certains régimes de vent, l'évolution des paramètres ρ , masse volumique du fluide ; U , sa vitesse ; S , la surface balayée par les pâles du système éolien et en définitive $\dot{m}$, son débit massique seront déterminant dans la part du récupérable. C'est pourquoi, le fluide de service étant compressible, il est impérieux de faire un rappel exhaustif sur les fluides compressibles toute chose pouvant aider à comprendre les orientations à suivre.

2. Concepts et définitions

➤ **Volume de Contrôle, Frontière, Système thermodynamique**

Une portion d'espace est désignée par volume de contrôle, lorsqu'elle est limitée par une surface fermée appelée frontière. Si elle contient une certaine quantité de matière, elle est désignée par système thermodynamique.

➤ **Milieu extérieur, Milieu intérieur, Système fermé, Système ouvert, Section d'entrée et de Sortie**

La frontière sépare l'environnement qui la recouvre, appelé milieu extérieur de l'environnement qu'elle recouvre, désigné par milieu intérieur. Lorsque la frontière ne permet aucun échange de matière avec son milieu extérieur, le système est dit fermé. Si de plus, le système ne permet aucun échange ni de travail ni de chaleur alors, il est

dit **isolé**. Lorsque la frontière ou certaines portions de celle-ci peuvent être traversées par de la matière, le système est dit ouvert et les portions de la frontière traversées sont appelées sections d'entrées et sections de sortie.

➤ **États de la Matière**

La matière existe sous trois états : **solide, liquide et gazeux**. Les deux derniers états sont désignés par **fluide**. Le **gaz** se distingue entre autres du liquide par le fait qu'il se déplace sous l'action des contraintes de cisaillement $\tau = \mu \frac{\partial v}{\partial y}$ et l'influence de la compressibilité qui est plus importante en comparaison avec le liquide.

➤ **État d'un système, Variables d'État**

L'état d'un système est défini par l'ensemble de ses propriétés macroscopiques (échelle de molécules). Chaque propriété est caractérisée par une grandeur appelée variable d'état. En général, les variables d'état considérées sont : la température, la pression et le volume.

➤ **Variable extensive, Variable Intensive**

Les variables extensives sont additives. Elles dépendent de la masse de la matière. Les variables intensives en revanche ne sont pas additives ; elles ne dépendent pas de la masse. Une variable intensive peut être obtenue en rapportant n'importe quelle variable extensive à la masse

➤ **Équilibre d'un système**

Un système uniforme, et dont les variables restent constantes dans le temps est dit en équilibre. Cependant, dans maintes situations, les écarts entre les états intermédiaires et l'équilibre sont si faibles qu'ils peuvent être négligés. D'où le concept d'équilibre thermodynamique local. Il est aussi avancé les concepts de quasi-équilibre et de transformation quasi statique.

➤ **Processus ou Évolution**

La succession des états par lesquels passe un système entre un état initial et un état final est appelée processus ou évolution. Cette transformation peut s'opérer avec éventuellement un échange d'énergie.

➤ **Cycle**

Un cycle est un ensemble de processus qui retourne à son état initial. Dans le cas contraire, la transformation est dite ouverte.

3. Généralités sur la thermodynamique

3.1. Premier principe de la thermodynamique ou principe de conservation de l'énergie

Soit un système matériel fermé, dont la frontière ne permet que des échanges de travail et de chaleur avec le milieu extérieur et qui subit une transformation le faisant passer d'un état 1 à un état 2. Le premier principe de la thermodynamique stipule que la variation de l'énergie totale du système est égale à la somme du travail et de la chaleur échangés.

$$E_{t2} - E_{t1} = (W + Q)_{1 \rightarrow 2} \quad (2.3)$$

Dans cette expression, $E_t = U + E_p + E_c$ représente l'énergie totale du système décomposée respectivement en énergie interne, en énergie potentielle et en énergie cinétique du système. W et Q étant le travail et la chaleur échangés avec l'extérieur. Le travail W est relatif à toutes les forces autres que celles qui dérivent d'un potentiel tandis que l'énergie potentielle E_p regroupe toutes celles qui dérivent d'un potentiel.

Associée à une transformation élémentaire, l'expression (2.3) en variables intensives s'écrit :

$$du + d(v^2/2) + gdz = \delta w + \delta q \quad (2.4)$$

Dans le cas d'un système ouvert, on écrit plutôt :

$$dh + d(v^2/2) + gdz = \delta w^* + \delta q \quad (2.5)$$

où w^* désigne le travail autre que celui des forces de pression en entrée et en sortie du système et des forces qui dérivent d'un potentiel. $h = u + p/\rho$ est appelé enthalpie massique du système. Dans le cas de fluide compressible, l'énergie potentielle gravitationnelle est presque toujours négligeable devant les autres formes d'énergie. Si de plus, on fait l'hypothèse de parois rigides ($w^* = 0$), et d'un écoulement adiabatique ($q = 0$), alors, de l'équation (2.5), on déduit la relation suivante :

$$h + v^2/2 = Cte \quad (2.6)$$

L'expression (2.6) est appelée enthalpie totale du système. Elle demeure valable même pour des transformations irréversibles.

3.2. Second principe de la thermodynamique ou principe d'évolution

Pour rendre compte de l'irréversibilité de transformations thermodynamiques, le concept d'entropie fut induit. C'est une variable d'état extensive notée S qu'on associe au degré de désordre à l'échelle microscopique et qui serait à l'origine de l'irréversibilité de certaines transformations. La variation d'entropie d'un système

résulte de la somme de la variation d'entropie ds_e due aux actions extérieures, et de celles intérieures ds_i due aux actions intérieures. Pour une transformation réelle, $ds_i \geq 0$ et pour une transformation réversible, $ds_i = 0$. Dans le cas d'un système fermé $ds_e = \delta q/T$. Le second principe se traduit alors par l'expression :

$$\delta q = Tds - Tds_i \quad (2.8)$$

où plus généralement par :

$$ds \geq \frac{\delta q}{T}$$

On déduit aussi du premier principe sous une transformation élémentaire réversible la relation :

$$du = Tds - Pd(1/\rho) \quad (2.9)$$

De même, on obtient de la définition de l'enthalpie la relation :

$$dh = Tds + dP/\rho \quad (2.10)$$

Dans le cas d'écoulement adiabatique réversible donc isentropique, $ds = 0$ et on obtient de (2.10)

$$dh = dP/\rho \quad (2.11)$$

appelée relation de Gibbs.

3.3. Théorie des gaz idéaux

Un gaz idéal ou (gaz parfait) est traduit sous sa forme intensive par l'équation :

$$P = r\rho T \quad (2.12)$$

où P , ρ et T sont respectivement : la pression, la masse volumique, et la température absolue du gaz. r , appelé constante du gaz considéré est le rapport R/M de la constante universelle des gaz parfaits $R = 8,3143 \text{ J.mol}^{-1}.K^{-1}$ à la masse molaire M du gaz. La masse molaire de l'air étant $M = 29 \text{ g.mol}^{-1}$, la constante de l'air vaut $r = 287 \text{ J.kg}^{-1}.K^{-1}$. Cette constante permet aussi de relier les chaleurs massiques à pression constante c_p et à volume constant c_v dans la relation suivante dite de Mayer

$$r = c_p - c_v \quad (2.13)$$

En posant $\gamma = c_p/c_v$, on déduit de (2.13) les formules suivantes :

$$c_p = \frac{\gamma r}{\gamma - 1} \quad (2.14)$$

et

$$c_v = \frac{r}{\gamma - 1} \quad (2.15)$$

Dans le cas d'un gaz parfait, la relation (3.4) peut être réécrite sous la forme :

$$du = \delta q - Pdv = c_v dT \quad (2.16)$$

Autrement dit, l'énergie interne et l'enthalpie d'un gaz parfait ne dépendent que de la température. En combinant les relations précédentes avec celle du (2.9), il s'ensuit que,

$$ds = c_v \frac{du}{T} + \frac{P}{T} d\left(\frac{1}{\rho}\right) = c_v \frac{du}{T} - r \frac{d\rho}{\rho} \quad (2.17)$$

L'application de la différentielle logarithmique à l'équation (2.12) permet d'obtenir :

$$\frac{dP}{P} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dT}{T} \quad (2.18)$$

Il se déduit alors successivement de (2.18), les relations qui suivent :

$$ds = c_v \frac{dP}{P} - (c_v + r) \frac{d\rho}{\rho} \quad (2.19)$$

$$ds = c_v \frac{dP}{P} - c_p \frac{d\rho}{\rho} = c_v \left(\frac{dP}{P} - \gamma \frac{d\rho}{\rho} \right) \quad (2.20)$$

En supposant la chaleur massique à volume constant c_v constant, et après intégration il se dégage la relation suivante :

$$s = c_v (\ln P - \gamma \ln \rho) + cte \quad (2.21)$$

Soit :

$$s = c_v \ln(P/\rho^\gamma) + cte \quad (2.22)$$

Ainsi donc, une transformation isentropique, c'est-à-dire adiabatique (sans échange de chaleur avec l'extérieur) et réversible (sans génération d'entropie) se caractérise par l'équation encore appelée loi de Laplace suivante :

$$P/\rho^\gamma = cte \quad (2.23)$$

4. Écoulements compressibles de fluides compressibles

Ce qui est connu comme équation de conservation de masse ou équation de continuité lors de l'écoulement d'un fluide est traduit par l'expression :

$$\frac{d\rho}{dt} + \text{div}(\rho \vec{U}) = 0 \quad (2.24)$$

Dans le cas d'un écoulement incompressible, les variations temporelles de la densité du fluide n'affectent pas significativement l'écoulement, de sorte que $dp/dt \approx 0$. D'autre part, lorsque le fluide est incompressible, $\rho = \text{cte}$ et l'équation (2.24) se réduit à :

$$\text{div}(\vec{U}) = 0 \quad (2.25)$$

4.1. Célérité du son et nombre de Mach

Pour ce qui est d'un écoulement compressible de fluide compressible, les choses ne sont pas aussi simples. En effet, de petites variations de masse volumique, de pression ou de vitesse se propagent à l'intérieur du fluide et modifient considérablement ses propriétés. Toute perturbation intervenue dans un fluide compressible initialement au repos se propage au sein de celui-ci avec une célérité qui est celle du son dans ce milieu. Cette célérité est donnée par :

$$a = \sqrt{\gamma \frac{P}{\rho}} = \sqrt{\gamma r T} \quad (2.26)$$

Un facteur utilisé pour caractériser les écoulements compressibles est le nombre de Mach. Il se définit comme le rapport de la vitesse U de l'écoulement d'un fluide dans un milieu à la célérité du son dans ce dernier.

$$M_a = \frac{U}{a} \quad (2.27)$$

Une classification des écoulements suivant le nombre de Mach est établie comme suit :

Pour $M_a < 0,3$: l'écoulement peut être considéré **incompressible**, car les effets de variation de masse volumique ne sont pas significatifs. Par exemple, un écoulement dans l'air à une vitesse $u \cong 0,3a \cong 100 \text{ m/s}$ peut être considéré incompressible.

Pour $0,3 < M_a < 0,8$: l'écoulement est dit **subsonique**. Les effets de masse volumique sont importants, mais il n'y a pas d'onde de choc.

Pour $0,8 < M_a < 1,2$: l'écoulement est **transsonique**. Des ondes de choc apparaissent divisant l'écoulement en différentes régions subsoniques et supersoniques.

Pour $1,2 < M_a < 3$: l'écoulement est **supersonique**. Des ondes de choc apparaissent et il n'y a pas de région subsonique.

Pour $3 < M_a$: l'écoulement est **hypersonique**. Des ondes de chocs et d'autres phénomènes sont particulièrement intenses.

Remarque : il est quasiment impossible d'obtenir des écoulements soniques avec des liquides, car, il faudra exercer des pressions de l'ordre 10^3 atm . En revanche, dans les gaz, un rapport de pression de 2 suffit pour générer des vitesses soniques.

4.2. Écoulements isentropiques unidirectionnels de gaz parfaits

De nombreux dispositifs sont utilisés dans diverses applications dans le but de convertir de l'énergie cinétique en travail. C'est le cas des éoliennes, des aubages distributeurs de turbines à gaz ou à vapeur, des aubages redresseurs de compresseurs ou tuyères propulsives de turboréacteurs ou moteurs de fusées, etc. Il apparaît donc judicieux de revisiter l'aspect thermodynamique des écoulements dans de tels dispositifs en se limitant à ceux unidirectionnels. Il faut d'ores et déjà rappeler les hypothèses favorisant l'implémentation de tels écoulements.

- Les forces de gravité sont négligées devant celles de pression et d'inertie.
- Le fluide de service est supposé parfait, c'est-à-dire non visqueux. En effet, les vitesses mises en œuvre sont grandes avec de forts cisaillements de sorte qu'il est légitime de négliger les forces de viscosité devant les forces d'inertie. Le nombre de Reynold, très grand observé dans ces cas-là, offre une raison supplémentaire de la justesse de l'hypothèse faite ci-dessus. En fluide parfait, la vitesse est uniforme dans une section droite de l'écoulement. Cependant, il existe un profil de vitesse et comme la vitesse est nulle à la paroi, elle est par conséquent maximale au centre. Mais, le nombre de Reynold est très grand et un profil quadratique est représenté par un profil "plat" de vitesse égale à la vitesse de débit. La vitesse uniforme à toute section est ainsi bien justifiée.
- Écoulement adiabatique : l'échange de chaleur avec l'extérieur est nul ($Q = 0$). La question peut être réglée avec un choix adéquat de la paroi (faible conductibilité thermique). Mais au-delà, comme les échelles de temps des échanges thermiques sont beaucoup plus grandes que les échanges de temps des compressions, les échanges de chaleur n'ont pas le temps de se produire.
- Écoulement permanent : toute grandeur de l'écoulement est indépendante du temps.
- Écoulement réversible, donc isentropique (pas d'onde de choc)
- Aucune réaction chimique n'est admissible.

L'écoulement envisagé dans cette partie est isentropique, c'est-à-dire réversible et adiabatique. C'est un écoulement sans onde de choc et dans lequel les forces de frottements sont négligeables. Les écoulements isentropiques unidirectionnels

compressibles de fluides parfaits sont considérés surtout, lorsque les écoulements envisagés sont dans les conduites. Les conséquences immédiates de ces hypothèses, c'est que l'équation de quantité de mouvement ou équation d'Euler prend la forme :

$$UdU + \frac{dP}{\rho} = 0 \quad (2.28)$$

Ce point étant fait, il est utile de rappeler un certain nombre de résultats déterminants pour la suite.

4.3. Quelques résultats utiles

➤ Équation de Bernoulli II

Il est connu sous le nom d'équation de Bernoulli I et relativement au fluide incompressible, l'expression suivante :

$$H = \frac{1}{2g} U^2 + \frac{P}{\rho g} + z = cte \quad (2.29)$$

qui traduit la conservation de la charge. L'analogue de la précédente équation dite équation de Bernoulli II, pour les fluides compressibles, est obtenue à partir de l'application du premier principe de la thermodynamique le long d'un filet de courant et s'écrit :

$$H = \frac{h}{g} + \frac{1}{2g} U^2 + z = cte \quad (2.30)$$

Cette expression se traduit en disant qu'un écoulement permanent adiabatique de gaz parfait est homoénergétique. D'après les hypothèses adoptées, le fluide est non pesant donc l'équation (2.30) sera utilisée sous sa forme simplifiée :

$$h + \frac{1}{2} U^2 = cte \quad (2.31)$$

➤ Gradeurs d'arrêt ou état générateur

Un état d'arrêt, total, ou de stagnation, est l'état que prend toute variable de l'écoulement, amenée au repos de manière isentropique. Cet état correspond aussi aux conditions d'un état générateur c'est-à-dire, à celles d'un réservoir haute pression ou chambre de combustion d'un réacteur puisqu'en effet, le gaz sous haute pression est tel que $U_0 \cong 0$. Les variables associées à un tel état porteront l'indice zéro (0). L'enthalpie d'arrêt, totale ou de stagnation représentant la somme de l'énergie cinétique et de l'enthalpie locale est notée :

$$h_0 = h + \frac{1}{2} U^2 \quad (2.32)$$

Étant donné que l'enthalpie d'un gaz parfait s'écrit $h = c_p dT$, La température totale s'obtient après intégration par la formule suivante :

$$T_0 = T + \frac{U^2}{2c_p} \quad (2.33)$$

Les équations (2.31) et (2.32) sont valables pour tout écoulement adiabatique donc pour des écoulements à onde de choc, la température T_0 demeure constante.

➤ **Équation de Barré de Saint-Venant**

Elle s'applique aux processus irréversibles. Elle s'établit aisément par combinaison des équations (2.26), (2.27) et (2.32) et se présente initialement sous la forme :

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_a^2 \quad (2.34)$$

L'équation (2.34) présente l'avantage de relier la température totale au nombre de Mach en un point quelconque de l'écoulement. Elle permet également, par combinaison avec les relations (2.12) et (2.23), de relier d'autres variables au nombre de Mach :

$$\frac{P_0}{P} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_a^2\right)^{\gamma/\gamma-1} \quad (2.35)$$

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_a^2\right)^{1/\gamma-1} \quad (2.36)$$

$$\frac{a_0}{a} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_a^2\right)^{1/2} \quad (2.37)$$

➤ **Conditions critiques**

Ce sont celles qui prévalent en un point de l'écoulement où la vitesse est sonique, c'est-à-dire, lorsque $M_a = 1$. Les grandeurs critiques seront notées avec un astérisque. Elles sont aisément déduites des relations précédentes en posant $M_a = 1$.

$$\frac{T^*}{T_0} = \frac{2}{\gamma + 1} \quad (2.38)$$

$$\frac{P^*}{P_0} = \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\gamma/\gamma-1} \quad (2.39)$$

$$\frac{\rho^*}{\rho_0} = \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{1/\gamma-1} \quad (2.40)$$

$$\frac{a^*}{a_0} = \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{1/2} \quad (2.41)$$

Il est à noter aussi que la vitesse critique s'identifie à la vitesse du son critique qui ne dépend que de la température à l'état générateur du gaz.

$$U^* = a^* = \left(\frac{2\gamma}{\gamma + 1} rT_0 \right)^{1/2} \quad (2.42)$$

Par exemple, dans le cas particulier de l'air avec $\gamma = 1,4$ les quantités précédentes prennent les valeurs :

$$\frac{T^*}{T_0} = 0,8333 ; \frac{P^*}{P_0} = 0,5283 ; \frac{\rho^*}{\rho_0} = 0,6339 ; \frac{a^*}{a_0} = 0,9129.$$

➤ Seuil de compressibilité

Dans la relation (2.35), en posant $n = \gamma/(\gamma - 1)$, $x = \frac{\gamma-1}{2} M_a^2$, et en procédant à un développement limité d'ordre 2, il s'en suit que :

$$P_0 - P = \frac{1}{2} \rho U^2 \left(1 + \frac{M_a^2}{4} + O(M_a^4) \right) \quad (2.43)$$

Ainsi, l'équation de Bernoulli apparaît comme un développement limité d'ordre deux de l'équation de Saint-Venant avec une marge d'erreur de $M_a^2/4$ qui vaut 1% lorsque $M_a = 0,2$ et 6% pour $M_a = 0,5$. Il ressort de ce résultat, que lorsque $M_a < 0,3$, un fluide compressible peut raisonnablement être considéré comme un fluide incompressible ; $P_0 \cong \frac{1}{2} \rho U^2 + P$.

Dans la limite d'incompressibilité énoncée ci-dessus, le débit massique $\dot{m} = \rho UA$ peut s'exprimer en termes de nombre de Mach. Il suffit pour cela de combiner adroitement les équations (2.12), (2.27) et celles de Saint-Venant pour obtenir :

$$\dot{m} = AP_0 M_a \left(\frac{\gamma}{rT_0} \right)^{1/2} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_a^2 \right)^{(\gamma+1)/(2-2\gamma)} \quad (2.44)$$

Il est à noter qu'il existe une vitesse maximale pour l'écoulement. En effet, une détente du gaz depuis le réservoir jusqu'au vide ($P = 0$), ce qui entraîne ($T = 0$), induirait d'après l'équation (2.32) une vitesse maximale U_{max} telle que :

$$U_{max} = (2c_p T_0)^{1/2} = a_0 \left(\frac{2}{\gamma-1} \right)^{1/2} \quad (2.45)$$

Cette vitesse maximale U_{max} ne dépend que des conditions régnant dans l'état générateur. Elle ne peut être atteinte que pour une détente isentropique.

Dans un écoulement de fluide incompressible, la conservation du débit est ramenée au débit volumique, puisque lors des changements de section, la masse volumique ne subit pas de variation notable. Mais dans le cas d'un écoulement compressible, chaque

variation de section induit une variation importante de masse volumique et de vitesse dans des proportions parfois imprévisibles. Il est important de revisiter le comportement des fluides compressibles confrontés aux variations de section.

4.4. Écoulement isentropique avec variation de section

➤ Relation Vitesse-masse volumique

En combinant les équations de la célérité du son (2.26) et quantité de mouvement (2.28), il est aisé d'obtenir :

$$M_a^2 \frac{dU}{U} = - \frac{d\rho}{\rho} \quad (2.46)$$

Dans le contexte courant de mise en œuvre de l'écoulement des fluides compressibles dans les applications industrielles évoquées, c'est l'accélération de la vitesse qui est recherchée. La relation (2.46), indique que toute augmentation de la vitesse s'accompagne d'une diminution de la masse volumique. Cependant, le degré de variation dépend du nombre de Mach.

➤ Écoulement subsonique ($M_a < 1$) [74-75]

Dans ce cas, la masse volumique baisse moins rapidement que la vitesse ne croît $|dU/U| > |d\rho/\rho|$

Ainsi, en régime subsonique, la quantité ρU augmente dans la direction de l'écoulement. La conservation de la masse $\rho U A = Cte$ suggère alors que la section A diminue.

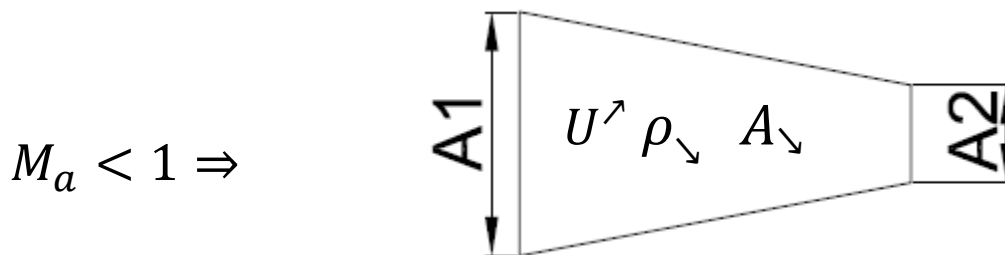


Figure 2.1: Structure convergente de l'écoulement dans le cas subsonique ($M_a < 1$)

➤ Écoulement supersonique ($M_a > 1$) [74-75]

Pour ce cas, régime supersonique, l'examen de l'équation (2.46) indique que la masse volumique diminue plus vite que la vitesse ne croît ce qui suggère $|dU/U| < |d\rho/\rho|$. Un raisonnement analogue au précédent cas montre que ρU diminue dans la direction de l'écoulement. La conservation de la masse implique donc un accroissement de la section.

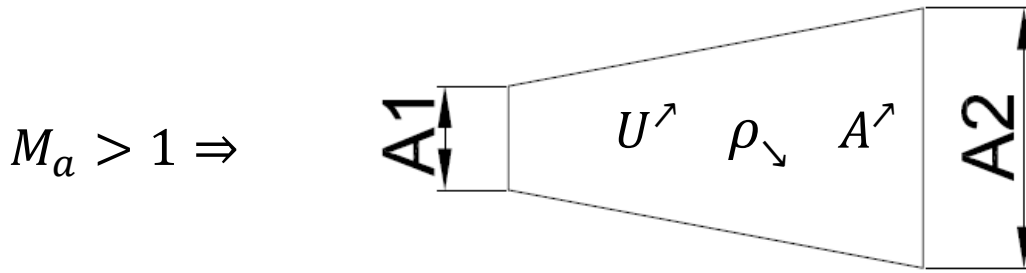


Figure 2.2: Structure divergente de l'écoulement dans le cas supersonique ($M_a > 1$)

Un raffinement de l'analyse précédente sur l'effet de la variation de la section d'une conduite, peut-être obtenu en combinant l'équation (2.46) et l'équation de conservation de masse $\dot{m} = \rho UA = Cte$. Ainsi, en réécrivant $d(\rho UA) = 0$ sous sa forme différentielle logarithmique. Il vient que :

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dU}{U} + \frac{dA}{A} = 0 \quad (2.47)$$

Une substitution du premier terme à sa valeur permet d'obtenir :

$$\frac{dA}{A} = (M_a^2 - 1) \frac{dU}{U} \quad (2.48)$$

La relation (2.48) est connue sous le nom de relation d'Hugoniot. Par suite, des équations (2.28) et (2.48) il vient que :

$$\frac{dP}{P} = \frac{1}{1 - M_a^2} \left(\frac{\rho U^2}{P} \right) \frac{dA}{A} \quad (2.49)$$

Un commentaire des relations (2.48) et (2.49) permet de confirmer les résultats obtenus ci-dessus. Mais au-delà, ces relations révèlent immédiatement, selon que l'écoulement soit subsonique ou supersonique, la forme à donner à la conduite pour effectuer une compression ou une détente. Il est important de rappeler que les cas souhaités sont les configurations de conduite pour lesquelles la vitesse est accélérée.

➤ **Singularité mathématique**

Il vient de l'équation (2.48) que $\frac{dU}{U} = \frac{1}{(M_a^2 - 1)} \frac{dA}{A}$ et au point sonique $M_a = 1$, l'accroissement de la vitesse est infini. Il s'agit là d'une singularité mathématique. Une réponse physique à ce phénomène impose que $dA = 0$. C'est-à-dire un minimum ou un maximum au point A.

➤ **Notion de Col**

Pour une continuité dans l'accroissement de la vitesse du fluide, il peut être envisagé une combinaison d'un convergent suivi d'un divergent, à section de raccordement minimale appelée col. En effet, le convergent assure l'augmentation du nombre de Mach lors d'un écoulement subsonique et le divergent fait augmenter davantage le

nombre de Mach s'il s'agit d'un écoulement supersonique. Il est dans ce cas possible d'avoir un écoulement sonique avec une section minimale.

Mais la combinaison divergent suivi de convergent est improductive puisqu'on ne peut obtenir un écoulement sonique à la section maximale (l'écoulement est supersonique dans le divergent).

Cependant, un col sonique ($M_a = 1$), ne garantit pas toujours un écoulement supersonique après le col. Tout dépend de la valeur de la pression en aval du divergent.

➤ Section et nombre de Mach

Dans la pratique, il est commode de relier le nombre de Mach d'une section A donnée à celle A^* référée au point critique (col). La mise en œuvre de la conservation de la masse suivie de quelques transformations simples permet de déboucher sur :

$$\frac{A}{A^*} = \frac{1}{M_a} \left[\frac{2}{\gamma + 1} \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_a^2 \right) \right]^{\frac{\gamma + 1}{2\gamma - 2}} \quad (2.50)$$

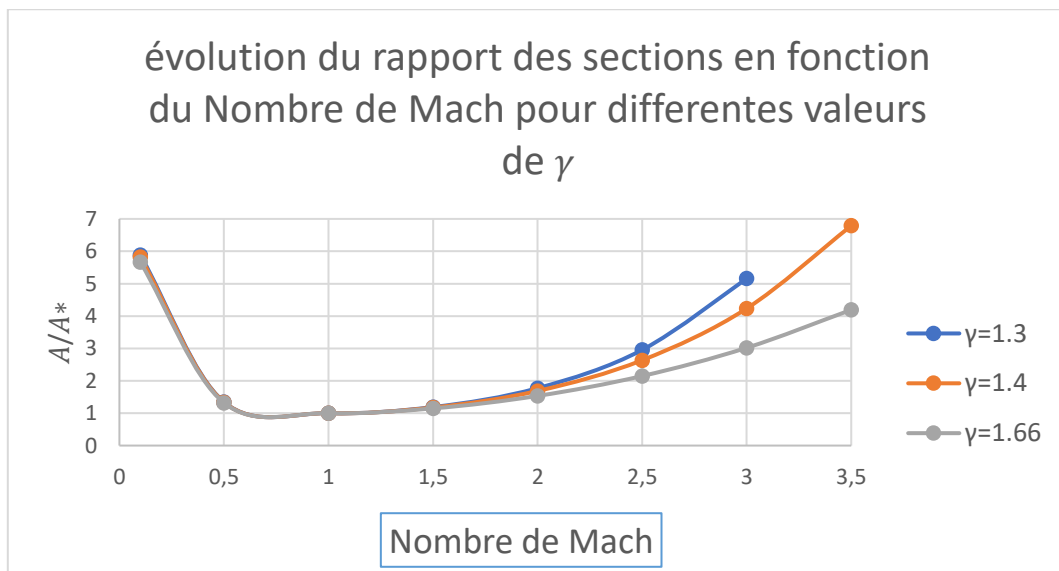


Figure 2.3: Évolution des rapports des sections en fonction du Nombre de Mach pour l'écoulement isentropique pour trois gaz : Air ($\gamma = 1.4$), Dioxyde de carbone ($\gamma = 1.3$), HÉLIUM ($\gamma = 1.66$)

La figure 2.3 montre une décroissance du rapport des sections dans toute sa branche subsonique, et ce quel que soit la nature du gaz. Cependant, pour $1 < M_a < 1.5$ on note une évolution quasi constante avant que la croissance ne devienne rapide surtout pour les gaz à coefficient adiabatique faible.

➤ Vitesse et nombre de Mach

De même, la nécessité de relier la vitesse et le nombre de Mach en un point de l'écoulement à celle au point critique s'impose parfois. Par la mise en œuvre de la conservation de la matière et de l'équation (2.50), il vient que :

$$\frac{U}{U^*} = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_a^2 \right)^{\frac{1}{\gamma-1}} M_a \left[\frac{2}{\gamma+1} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_a^2 \right) \right]^{-\frac{\gamma+1}{2\gamma-2}} \quad (2.51)$$

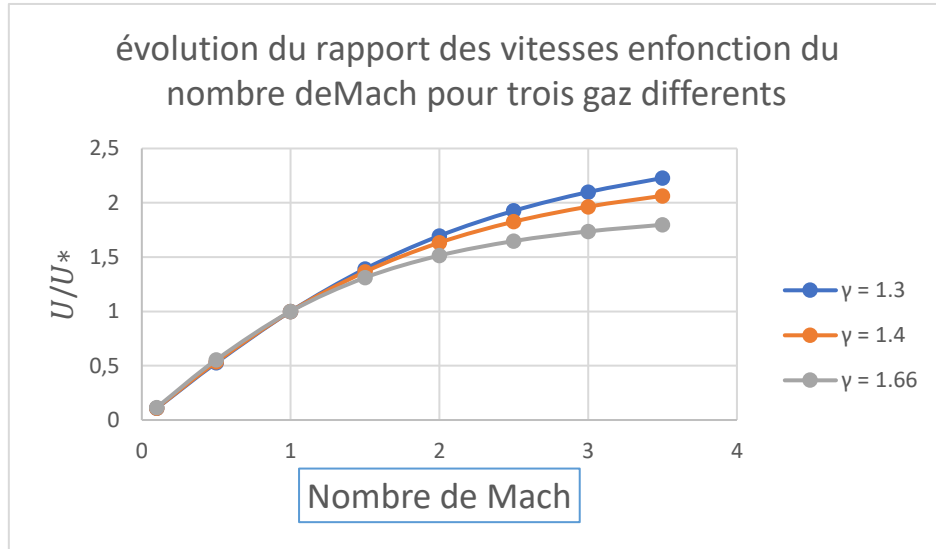


Figure 2. 4: Évolution des rapports des vitesses en fonction du Nombre de Mach pour l'écoulement isentropique pour trois gaz : Air ($\gamma = 1,4$), Dioxyde de carbone ($\gamma = 1,3$), Hélium ($\gamma = 1,66$)

Le rapport des vitesses croît, quelle que soit la valeur de M_a . On remarque que si $M_a < 1$, cette croissance est indépendante de la nature du gaz, mais le rapport reste inférieur à 1. En revanche, avec $M_a > 1$, cette croissance est plus prononcée avec un gaz de service à coefficient adiabatique faible.

Enfin, il est aussi utile de connaître l'expression du débit au col.

$$\dot{m}_{col} = \rho^* A^* U^* = \rho_o A^* a_o \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2\gamma-2}} \quad (2.52)$$

Il est remarquable que ce débit ne dépende que des conditions de l'état générateur et bien entendu de la nature du gaz.

NB : En annexe (2) quelques valeurs des nombres adimensionnels

4.5. Génération d'onde de choc

À l'apparition d'une onde de choc, l'écoulement cesse d'être isentropique. Elle résulte d'une discontinuité de la vitesse qui fait se propager des perturbations de pression et de masse volumique dans tout l'écoulement. L'onde de choc est créée par la rencontre

d'un écoulement amont supersonique et un écoulement subsonique aval. L'onde de choc génère de l'entropie est par conséquent, une baisse du débit d'écoulement. Cependant, dans un convergent, la survenue d'une onde de choc peut être évitée si le choix des sections du convergent respecte l'équation (2.50). C'est heureusement dans ce cadre que ce projet de thèse est conduit.

4.6. Conception et modélisation

Le convergent est conçu de telle sorte qu'il canalise le vent de sa section d'entrée vers la section de sortie. La loi de conservation du débit massique nous impose une variation des deux sections pour augmenter la vitesse de sortie. En se basant sur les équations développées plus haut, et en guise d'exemple, on retient pour une simulation, le modèle mécanique représenté à la figure 2.5. Cette modélisation est faite sous SolidWorks 2020. Le matériau utilisé pour la modélisation est l'acier galvanisé. Les paramètres géométriques du convergent sont indiqués dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1: Paramètres géométriques du convergent de flux de vent

Paramètre	Valeur (mm)
Diamètre d'entrée	$D = 600$
Diamètre de sortie	$d = D/3 = 200$
Longueur	$L = 1000$
Épaisseur de la tôle	$e = 2$

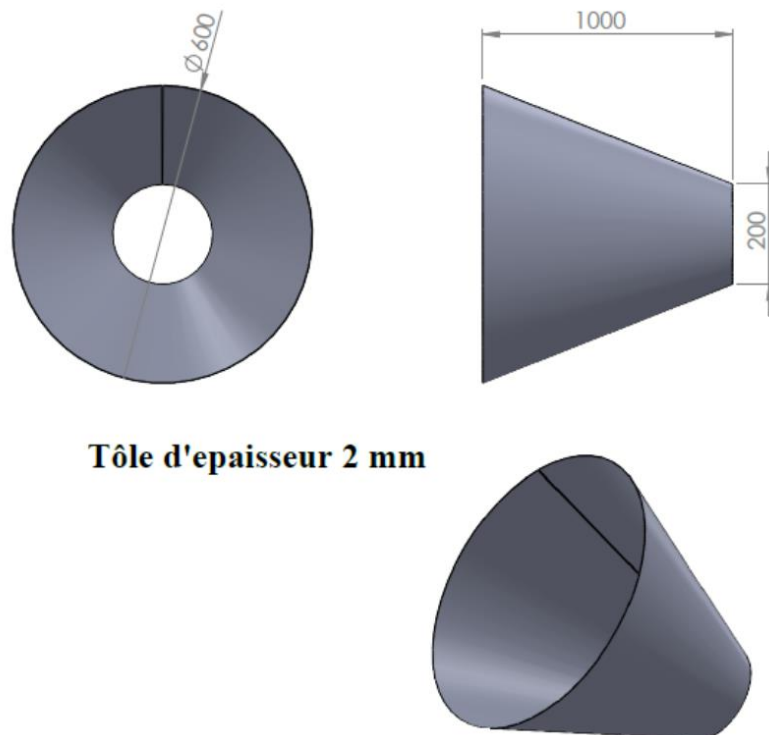


Figure 2. 5: Modèle mécanique de l'accélérateur du flux (convergent)

4.7. Analyse numérique de l'accélérateur de flux de vent

Pour calculer diverses propriétés d'un fluide telles que la pression, la vitesse et le débit d'écoulement, il faut résoudre l'équation de continuité et l'équation de Navier-Stokes qui traduisent la conservation de la masse et la conservation de la quantité de mouvement d'un écoulement. Ces équations sont résolues à l'aide d'une méthode numérique utilisant des conditions aux limites d'intervalles discrets. Autodesk CFD est utilisé dans cette étude pour la résolution numérique. Il utilise le solveur de discrétisation par la méthode des volumes finis (FVM) pour résoudre les équations d'écoulement à la limite de la surface volumétrique d'un élément de petit volume sur une géométrie maillée. Les équations directrices sont données par les expressions suivantes sous forme différentielle : [76-77]

— Équation de continuité (équation de bilan de la masse)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (2.53)$$

— Équation de bilan de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial (\rho \vec{V})}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = \vec{\nabla} \cdot P_t + \rho \vec{g} = -\vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \cdot \Sigma + \rho \vec{g} \quad (2.54)$$

— Équation de bilan de l'énergie

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho E \vec{V}) = \vec{\nabla} \cdot (P_t \cdot \vec{V}) + \rho \vec{g} \cdot \vec{V} + \vec{\nabla} \cdot \vec{q} + \vec{\nabla} \cdot \vec{q}_R \quad (2.55)$$

Les paramètres d'entrées et les conditions aux limites utilisées pour le calcul sont les suivants : vitesse constante à l'entrée $U = (3 \text{ m.s}^{-1}, 6 \text{ m.s}^{-1} \text{ et } 10 \text{ m.s}^{-1})$, les dimensions et matériaux du convergent et la pression de service qui est la pression atmosphérique. La pression de sortie est considérée comme une pression absolue. Un maillage tétraédrique est utilisé pour l'ensemble de l'analyse. Les valeurs de référence sont données à partir de l'entrée du convergent et sont indiquées dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2: Valeurs de référence de simulation

Densité (Kg/m ³)	Viscosité (Kg/m-s)	Aire (m ²)	Température (K)	Vitesse (m/s)	Pression (Pa)
1,292	18,5 x 10 ⁻⁶	0,2826	300	3 - 6 - 10	101325

L'analyse numérique du convergent de flux est effectuée avec le logiciel Autodesk CFD. Une étude détaillée de la variation de la pression et de la vitesse à l'intérieur de l'accélérateur a été simulée. Ceci permettra d'évaluer ses performances en sortie et d'apprécier la multiplication de la vitesse et la pression. Pour cette simulation, trois cas

différents de vitesse sont évalués. Les résultats de cette simulation sont présentés dans les figures qui suivent [87].

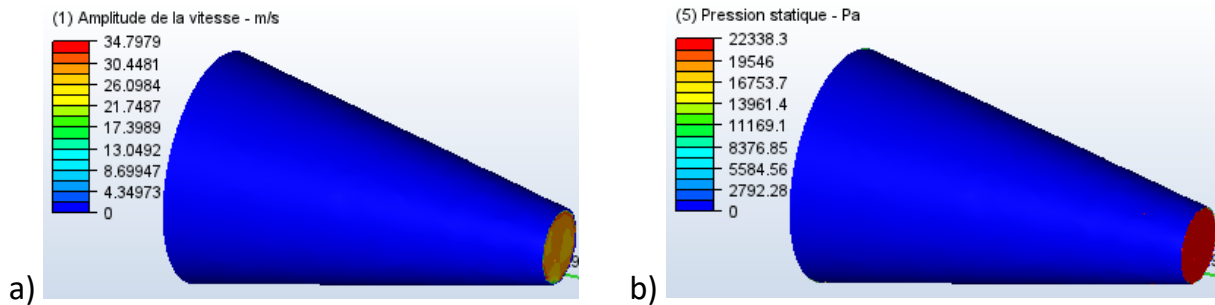


Figure 2.6: Amplitude de vitesse (a) et de la pression (b) à la sortie de l'accélérateur de flux pour une vitesse d'entrée de 3 m.s^{-1}

L'analyse de la figure 2.6 (a et b) nous montre que le convergent de flux est simulé pour une vitesse d'entrée de vent de 3 m.s^{-1} . Le nombre total de nœuds pour le maillage est de 283 573. On observe que des valeurs de vitesse d'entrée de 3 m.s^{-1} , il s'en suit une multiplication des valeurs de vitesse de sortie de l'ordre de 9 fois pour arriver donc à 27 m.s^{-1} . La valeur de la pression absolue à la sortie est à un maximum de 22338,3 Pa. On se rend compte que dans ce cas le nombre de Mach est de l'ordre de 0,09 inférieur à 0,3. D'après les études précédentes, on peut considérer que dans ces conditions, il s'agit d'un écoulement de fluide incompressible. Alors il s'agit d'une conservation de débit volumique. Les calculs montrent que la vitesse de sortie est le produit de la vitesse d'entrée par 9. L'hypothèse est donc confirmée par le logiciel.

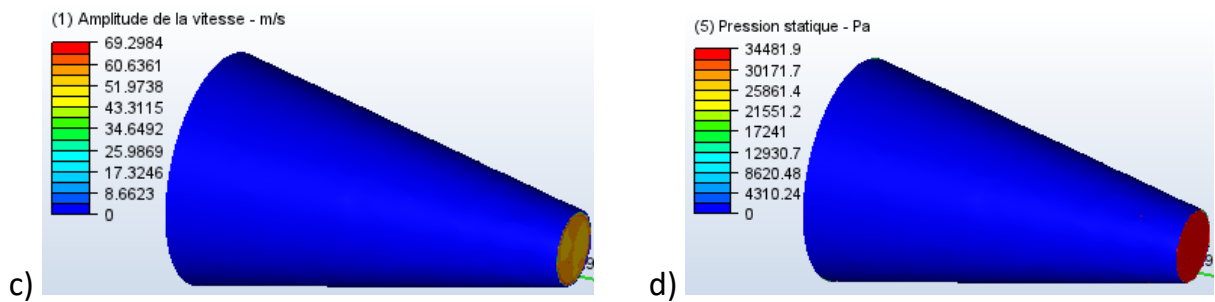


Figure 2. 7: Amplitude de vitesse (c) et de la pression (d) à la sortie de l'accélérateur de flux pour une vitesse d'entrée de 6 m.s^{-1}

L'accélérateur est simulé pour les paramètres de vitesse et de pression absolue. La figure 2.7 (c et d) représente l'évolution des paramètres de performance pour une vitesse d'entrée de 6 m.s^{-1} . La figure 2.7-c montre que la vitesse atteint un seuil maximal de 54 m.s^{-1} , tandis que la figure 2.7-d indique la pression à la sortie équivalente à 34481,9 Pa. Le nombre de Mach égal à 0.18 est inférieur à 0.3 et on constate ici aussi que l'écoulement se comporte comme un écoulement de fluide incompressible.

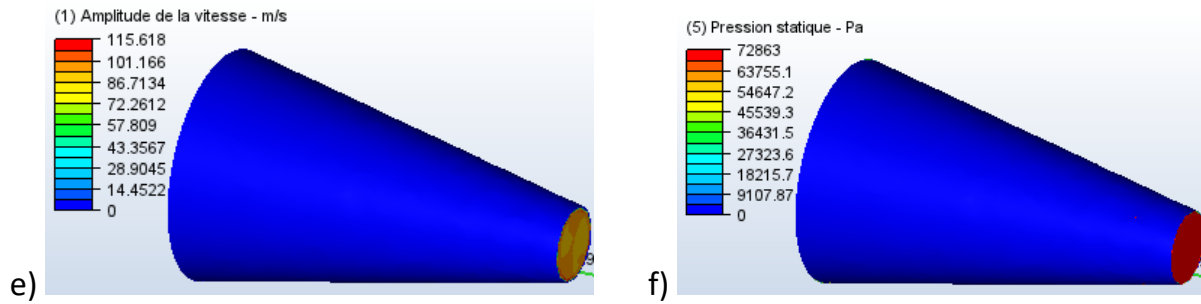


Figure 2. 8: Amplitude de vitesse (e) et de la pression (f) à la sortie de l'accélérateur de flux pour une vitesse d'entrée de 10 m.s-1

La figure 2.8 (e et f) présente les évolutions de la pression et de la vitesse pour le convergent pour une vitesse d'entrée de 10 m.s^{-1} . La pression à la sortie atteint 72863 Pa, tandis que la vitesse égale un maximum de 90 m.s^{-1} soit une multiplication de 9 fois.

L'examen des figures 2.6, 2.7 et 2.8 nous renseigne sur les performances attendues du convergent. On peut aisément remarquer que la vitesse à la sortie du convergent est multipliée en moyenne par 9 dans tous les cas de l'étude. Ce qui prouve que le dispositif proposé est effectivement un multiplicateur de vitesse. De toute évidence, l'utilisation du convergent sur un dispositif éolien va permettre de générer des puissances mécaniques plus élevées et donc une production d'énergie électrique bien meilleure.

Selon la configuration dimensionnelle du convergent proposé, il est clair qu'on peut atteindre n'importe quel niveau de multiplication voulu. Pour cela, il suffit de jouer sur les dimensions de la section d'entrée et la section de sortie ; le rapport des sections étant le multiplicateur de la vitesse d'entrée pour trouver celle de la sortie selon le principe de conservation de débit volumique.

5. Dispositif éolien à convergent de flux de vent

5.1. Présentation du schéma du dispositif

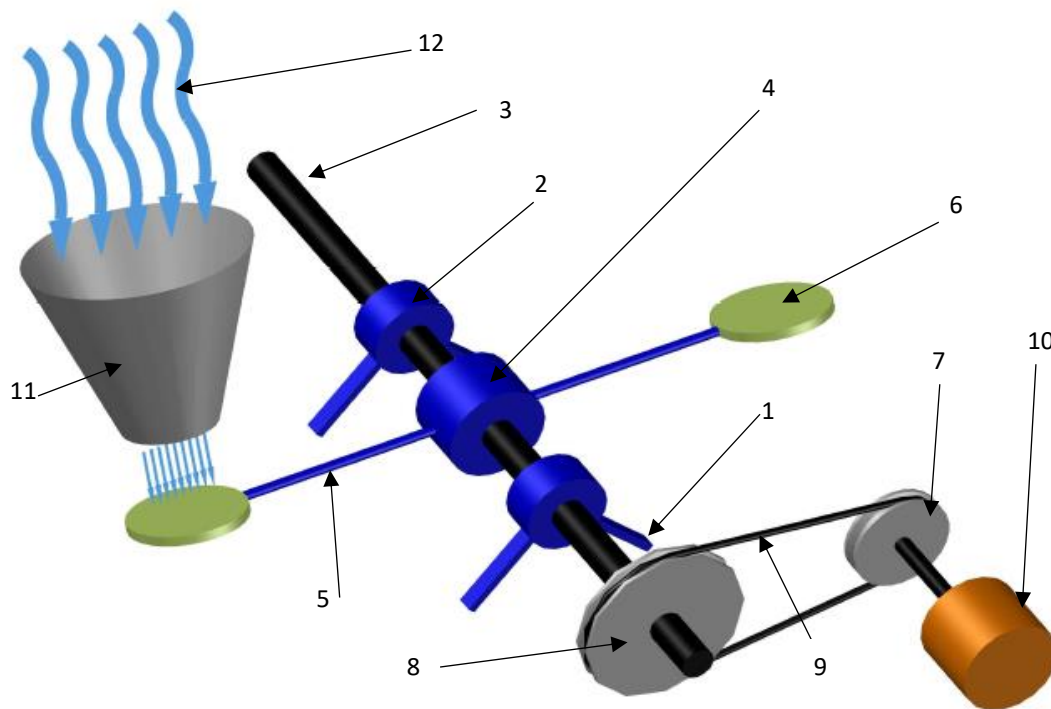


Figure 2. 9: Schéma du dispositif à convergent de flux

- 1- (2) Support
- 2- (2) paliers portant des roulements
- 3- axe
- 4- Disque cylindrique massif
- 5- (2) bras en fer torr
- 6- (2) pales en feuille de tôle circulaire
- 7- Poulie menée solidaire de l'axe d'un moteur
- 8- Poulie menante
- 9- Courroie de transmission de puissance entre poulies
- 10- Générateur
- 11- Convergents accélérateurs de vitesse de vent
- 12- Vent

5.2. Fonctionnement du dispositif avec ventilateur

Un ventilateur délivre un débit de vent approprié. Rapporté à la densité de l'air et à la grande section du convergent, il en résulte une vitesse de vent qui est portée à une maximale donnée, si le choix des sections du convergent respecte l'équation 2.50. En sortie du convergent, la puissance récupérable est donnée par l'équation 2.2, mais avec la prise en compte des conditions au col (ou état critique). En supposant que le

dispositif engendre des pertes (application de la pression dynamique sur les pales), qui ne dépassent guère celles évaluées par Betz, la puissance récupérable peut être frappée du coefficient (16/27) et du coefficient de perte de charge dans une conduite convergente K_{conv} . L'expression se présenter sous la forme théorique suivante :

$$\mathcal{P}_{théo} = 16/27 \times K_{conv} \times \mathcal{P}_{récupérable} = 8/27 \times K_{conv} \times \dot{m}_{col} U^{*2} \quad (2.56)$$

avec U^* donné par l'équation 2.42 qui ne dépend que du nombre Mach et de la nature du gaz.

Dans un convergent droit, l'expression du coefficient de perte de charge est donné par :

$$K_{conv} = \left(1/\mu - 1\right)^2 \times \sin \alpha \quad (2.57)$$

avec $\mu = S_1/S_2$: rapport des sections à la sortie de la conduite convergente

et α : angle que fait la génératrice du cône avec l'horizontale.

Dans le cas du cône utilisé dans cette étude, le rapport $S_1/S_2 = 1$, puisqu'à la sortie du convergent, la conduite reste constante et invariable. Cette configuration du convergent fait que le coefficient K_{conv} est négligeable car presque nul.

Les effets immédiats de cette puissance sont : une force exercée sur la pôle et un couple appliqué au dispositif donnés respectivement par :

$$F_{théo} = \mathcal{P}_{théo}/U^* = 8/27 \dot{m}_{col} U^* \quad (2.58)$$

$$C = F_{théo} \cdot R \quad (2.59)$$

où R est la longueur du bras en fer torr plus le rayon du disque, plus le diamètre d'une pôle cylindrique.

L'axe (3) du dispositif est ainsi entraîné en rotation dans les paliers (2) munis de roulement. La rotation de l'axe (3) entraîne en rotation la poulie menante (8) qui transmet la puissance à la poulie menée (7) par l'intermédiaire de la courroie (9). Ainsi, le générateur (10) est actionné pour produire de l'énergie électrique.

Les principes énoncés ci-haut sont relatifs au convergent disposé horizontalement. L'évaluation de la puissance fournie par les deux autres convergents sera présentée dans la suite et la puissance globale du dispositif serait ainsi déterminée.

Il est très important ici, de souligner que, eu égard aux équations 2.52 et 2.56, hormis les conditions de l'état générateur, que la seule façon de fixer une puissance donnée au dispositif, résulte du choix de la section A^* du col ou section critique. Cette section dans la théorie sera celle d'une pôle. Une fois A^* choisi, étant donné que l'état

générateur est bien connu, avec l'équation 2.52 on peut estimer le débit massique. Ensuite on fixe la puissance à donner au dispositif et à l'aide de l'expression 2.56, on peut calculer U^* (vitesse à la section critique). Connaissant les propriétés de l'état générateur, donc U_o , le nombre de Mach M_a peut être estimé à partir des expressions 2.51, puis à l'aide de 2.50 la section A peut être calculée. Notons que la démarche inverse peut être entreprise, c'est-à-dire qu'on peut choisir A puis calculer A^* .

Une synthèse du développement précédent est qu'on peut dimensionner le convergent dès lors que l'on connaît la vitesse moyenne sur un site, pour avoir une puissance voulue. C'est cette puissance qui est décomposée en couple et vitesse angulaire sur l'arbre du générateur.

5.2.1. Couple et Vitesse angulaire sur l'axe du générateur

La puissance théorique est transmise à l'axe du générateur de la façon suivante.

La vitesse angulaire du disque :

$$\Omega_D = \mathcal{P}_{théo} / C \quad (2.60)$$

La vitesse de rotation du disque, mais aussi de la grande poulie est :

$$N_{GP} = \frac{30}{\pi} \Omega_D \quad (2.61)$$

La vitesse de rotation sur l'axe du générateur

$$N_{ax} = \frac{R_{GP}}{R_{PP}} N_{GP} \quad (2.62)$$

Le couple sur l'axe du générateur

$$C_{ax} = \frac{30}{\pi} \cdot \frac{\mathcal{P}_{théo}}{N_{ax}} \quad (2.63)$$

La puissance sur l'axe du générateur

$$\mathcal{P}_{ax} = \mathcal{P}_{théo} \quad (2.64)$$

5.2.2. Effet du rapport de transmission des poulies sur les valeurs mécaniques du générateur

Un programme Matlab élaboré a permis de produire les valeurs mécaniques du générateur. En prenant pour l'air ($\gamma = 1,4$) et en fixant ($U_o = 4 \text{ ms}^{-1}$), les courbes suivantes sont tracées sous Excel.

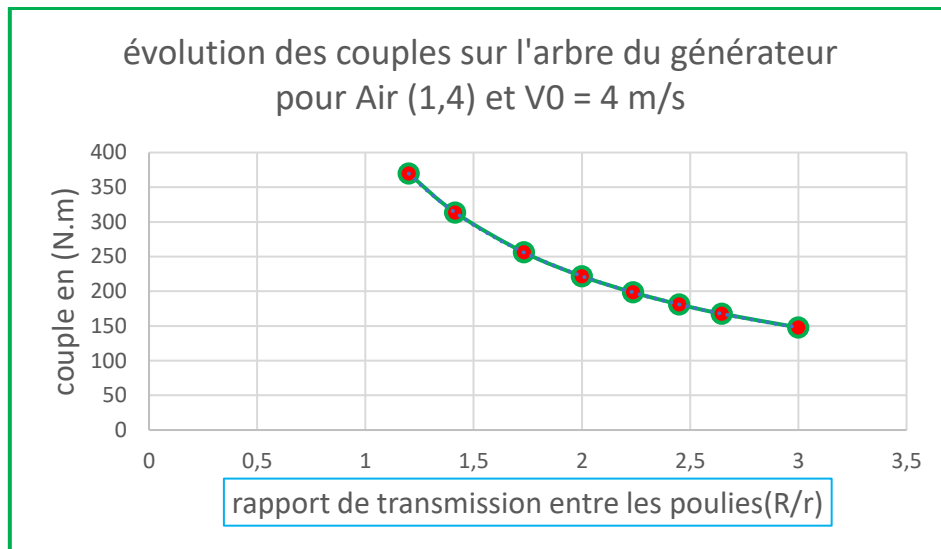


Figure 2. 10: Effet sur le couple du générateur en fonction du rapport de transmission des poulies

L'évolution de la courbe montre que le couple sur l'axe du générateur décroît lorsque le rapport de transmission des poulies croît.

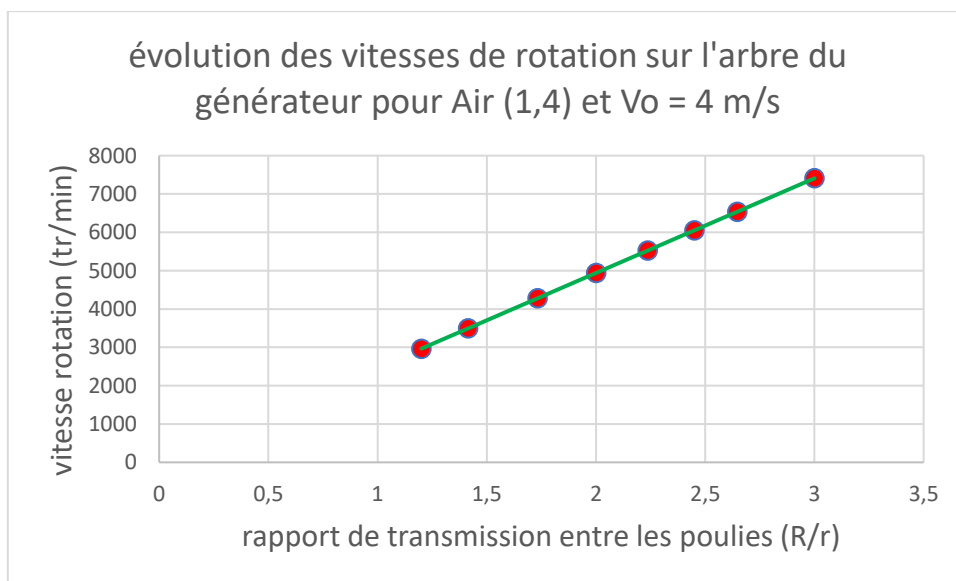


Figure 2.11: Effet sur la vitesse de rotation du générateur en fonction du rapport de transmission des poulies

La figure 2.11 montre une croissance de la vitesse de rotation sur l'arbre du générateur avec le rapport de transmission des poulies.

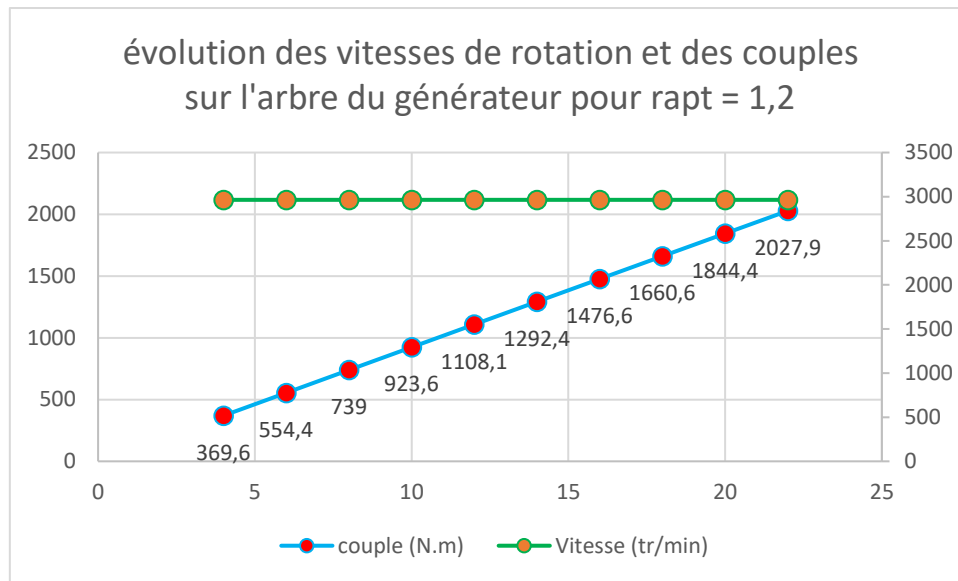


Figure 2. 12: Effet sur le couple et la vitesse de rotation de la vitesse à l'entrée du convergent

Pour un rapport de transmission fixé, la vitesse de rotation reste constante, pendant que le couple croît avec la vitesse du vent à l'entrée du convergent. La vitesse de rotation ne dépend donc que du rapport de transmission des poulies.

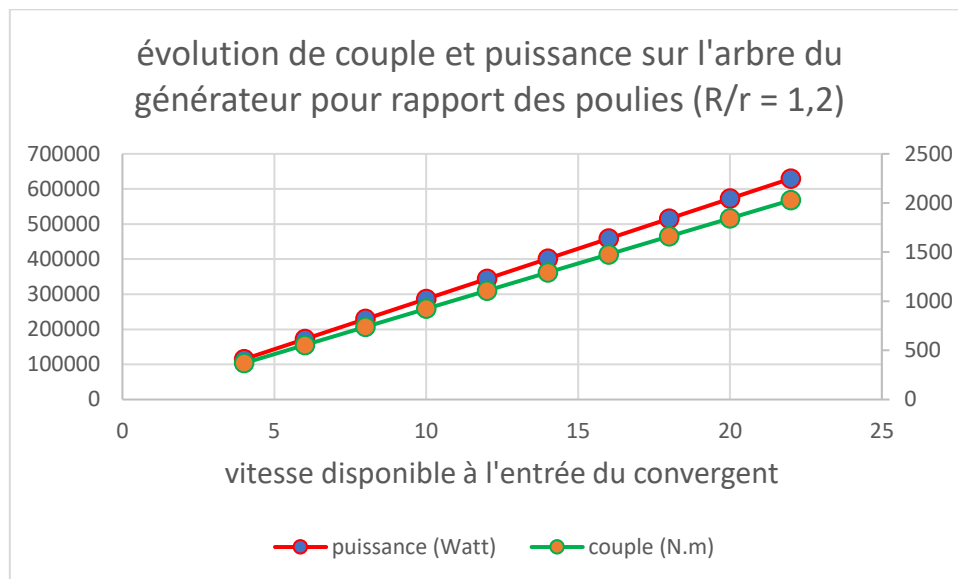


Figure 2.13: Effet sur le couple et la vitesse angulaire de la vitesse à l'entrée du convergent

Sur la figure 2.13, il est noté que couple et puissance varient de façon linéairement croissante en fonction de la vitesse du vent à l'entrée du convergent pour un rapport de transmission donné.

Il faut ajouter à cet ensemble de courbes, celle qui traduit la variation d'une section donnée du convergent par rapport à la section critique (2.50). Ici, le choix de courbe a porté sur le rapport des diamètres, afin de permettre une lecture directe sans un calcul supplémentaire.

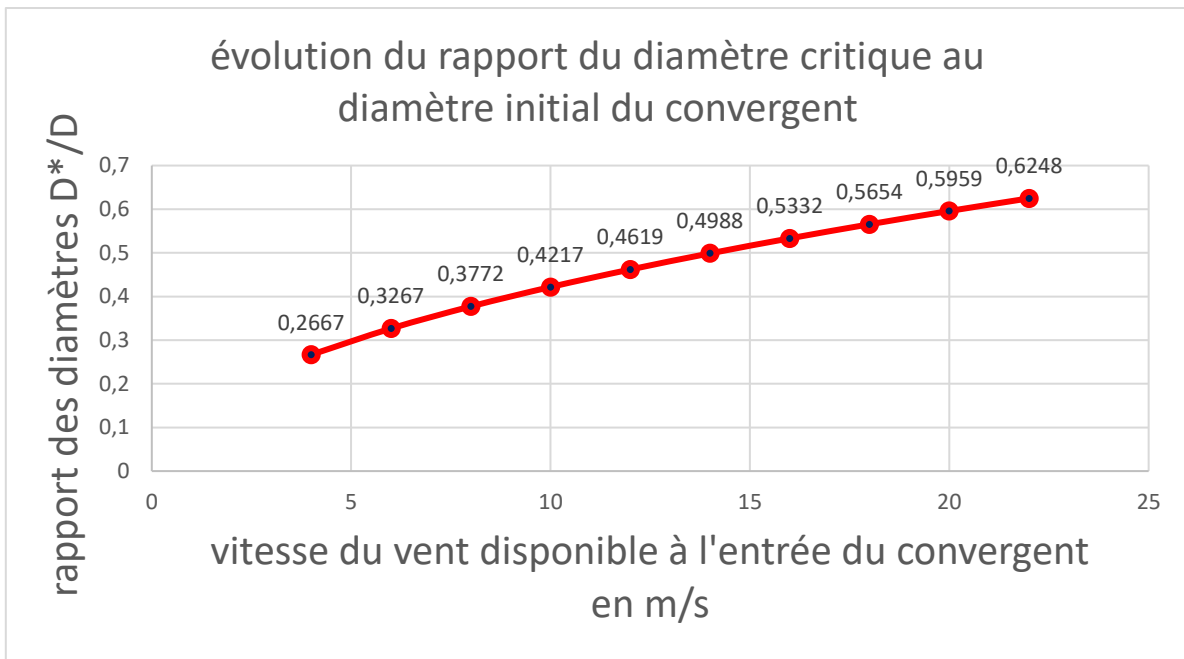


Figure 2. 14: Variation du rapport diamètre critique diamètre quelconque pour des vitesses à l'entrée du convergent.

L'évolution de la figure 2.14 montre un accroissement continu du rapport des diamètres avec les vitesses disponibles à l'entrée du convergent. Ceci augure d'un encombrement certain du dispositif lorsque l'installation de grandes vitesses sera envisagée. Toutefois, cet encombrement sera d'une tout autre nature. Il sera horizontal contre la verticalité des éoliennes classiques. Avec cette courbe, le choix des caractéristiques du convergent est plus facile puisqu'il suffit juste de faire une lecture du graphique contrairement au raisonnement développé à la section. Ici, il s'agira de faire un choix d'un des diamètres tenant compte de la puissance voulue, de lire la valeur du rapport des diamètres et de calculer le deuxième.

5.2.3. Commentaire des courbes

Les figures 2.10 et 2.11 montrent que lorsque le rapport de transmission croît, le couple sur l'arbre diminue pendant que la vitesse de rotation augmente. Quant à la figure 2.12, elle montre que pour un rapport donné, la vitesse de rotation demeure constante et que le couple lui, croît avec la vitesse à l'entrée du convergent. Par ailleurs, la figure 2.13 indique que couple et puissance croissent avec la vitesse du vent à l'entrée du convergent.

Avec ces observations, il apparaît qu'il est possible de faire tourner un générateur donné à son point de fonctionnement. Il suffira en effet de réaliser la vitesse de son point de fonctionnement par un choix judicieux du rapport de transmission en se référant à (2.62) toute chose étant égale par ailleurs. Le calcul de ce rapport de transmission nécessite la connaissance de la vitesse de rotation du disque qui est

fournie par l'équation (2.60) dans laquelle la puissance théorique devra être prise égale à la puissance du générateur.

Résumons : le dispositif peut être taillé à la puissance que doit fournir le générateur. La vitesse du vent à travers le débit du ventilateur étant connue, il faut ensuite définir les dimensions du convergent par le choix de sa petite section et le calcul de la grande. Puis en suite, il faut choisir le rapport de transmission des poulies pour obtenir la vitesse du point de fonctionnement et le tout est joué.

Exemple concret

À supposer qu'il faille mettre en œuvre, un générateur dont le point de fonctionnement est le suivant : $(N_f, C_f, \mathcal{P}_f)$.

➤ Détermination du convergent

Il faut dans un premier temps poser $\mathcal{P}_f = \mathcal{P}_{théo}$ (2.56) ; en remplaçant U^* et $\dot{m}_{col}$ par leur expression (2.42) et (2.52), $\mathcal{P}_f$ ne dépend plus que des paramètres de l'état générateur (ventilateur) supposés connus et de la section critique A^* . Le gaz de service de l'exemple est de l'air avec $\gamma = 1,4$. A^* peut être ainsi facilement calculé.

Une fois A^* calculé, la grande section du convergent A peut à son tour être calculée avec (2.50) ou être simplement lu sur une table (voir en annexe). Bien évidemment, il faudra calculer le nombre de Mach qui est fonction de l'élément générateur (ventilateur) à utiliser.

Le convergent devant permettre de délivrer la puissance $\mathcal{P}_f$ peut ainsi être construit.

➤ Imposition de N_f

Pour imposer la vitesse de rotation N_f , il suffit de remplacer dans (2.62), N_{ax} par N_f et de calculer le rapport de transmission R_{GP}/R_{PP} . Ce rapport fournit un élément de construction des poulies de transmission de puissance. Il faut signaler que la quantité R , qui figure dans l'expression représente, la somme du rayon du disque, de la longueur du bras en fer torr et du diamètre d'une pôle. Le choix de R qui rentre dans le calcul de N_{GP} sera fait en tenant compte de l'encombrement du dispositif.

En respectant scrupuleusement les indications des deux sous-paragraphe précédents, on obtient nécessairement le couple C_f .

Le dispositif peut ainsi être taillé pour faire fonctionner n'importe quel générateur de n'importe quelle puissance à son point de fonctionnement. Les problèmes qui vont cependant se poser, s'agissant des puissances de l'ordre du Mégawatt, seront l'encombrement et le ventilateur capable de produire les paramètres générateurs nécessaires. Les encombrements traditionnels des éoliennes classiques, longueurs des

mâts et des pâles seront remplacés par une plus grande taille du convergent. R serait aussi considérablement impacté.

5.2.4. Nombre de pâles et ventilateurs

D_p : Diamètre d'une pôle

R_D : Rayon du disque massif

l_b : Longueur du bras en fer torr

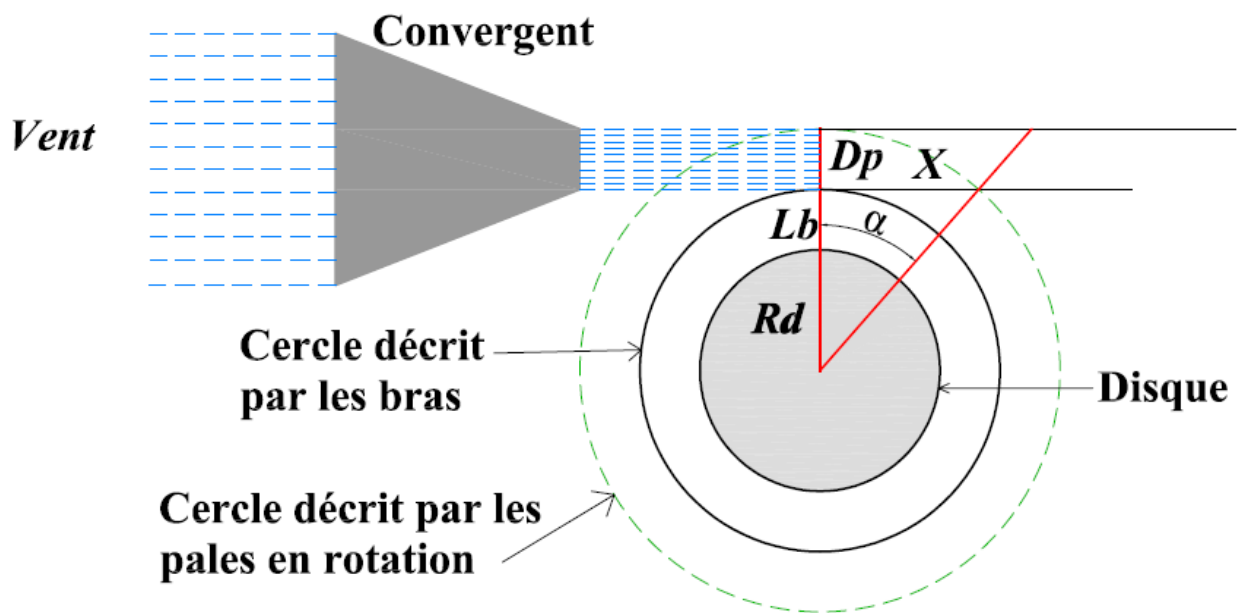


Figure 2.15: Schéma de rotation d'une pale sous la pression dynamique d'un convergent

Une pôle de diamètre D_p est fixée sur un bras de longueur l_b qui lui, est vissé sur un disque de rayon R_D . Sous la pression dynamique du convergent, la pôle entraine en rotation le disque. Lorsque la pale a tourné d'un angle α , elle sort du champ d'action du convergent. Si la pôle était unique et que l'énergie cinétique absorbée par le disque n'est pas suffisante pour ramener la pôle dans le champ d'action du convergent, alors, le mouvement cesse. D'autre part, le mouvement ne pourra même pas s'amorcer, si au départ, elle n'est pas dans le champ d'action du convergent.

De toute évidence, une pale unique ne pourra pas garantir la continuité du mouvement et donc la production de l'énergie électrique. Alors combien de pales faudra-t-il ? Et comment le déterminer ?

Le disque étant fixé et de masse donnée, les éléments susceptibles de varier dans la perspective d'installation de grandes puissances de production d'énergie électrique, sont la longueur l_b du bras et le diamètre D_p de la pale. Posons donc pour cela :

$$l_b = n R_D \text{ et } D_p = m R_D : (n, m) \in \mathbb{R}_+^* \times \mathbb{R}_+^*$$

Dans le triangle imbriqué dont l'un des côtés de l'angle droit est X (figure 2.15), on a :

$$\cos \alpha = \frac{R_D + l_b}{R_D + l_b + D_p} = \frac{1 + n}{1 + n + m} \quad (2.65)$$

et

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{1 + n}{1 + n + m} \right) \quad (2.66)$$

Ainsi, l'angle de sortie de la pale du champ d'action du convergent, dépend du choix des dimensions de la longueur du bras et du diamètre de la pale pour un disque fixé. Le nombre minimal de pâles qu'il faudra pour garantir la continuité du mouvement sera donc :

$$N_p = 360/\alpha \quad (2.67)$$

Cas pratique

À supposer le ventilateur soit capable de fournir un débit d'air de $6000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, que le grand diamètre du convergent soit $D = 60 \text{ cm}$, que celui du disque soit $D_d = 46 \text{ cm}$ et la longueur du bras soit $l_b = 65 \text{ cm}$. En prenant la masse volumique de l'air $\rho_a = 1,25 \text{ kg m}^{-3}$, la vitesse insufflée par le ventilateur est évaluée à environ $U \cong 6 \text{ m s}^{-1}$. Une lecture sur la figure 2.14 montre que le rapport des diamètres est d'environ 0,33. Le diamètre critique se déduit alors aisément, $D^* = 0,33.D = 20 \text{ cm}$. Il est remarquable sur la figure (2.15) que $D^* = D_p$.

Il vient que : $\alpha = 60^\circ$ et $N_p = 6$.

En conclusion, si l'on veut disposer d'un seul convergent et donc d'un ventilateur dans les conditions décrites ci-dessus, il faudrait visser sur le disque six (6) pales décalées entre elles de 60° .

Cependant, pour maintenir une sécurité dans le fonctionnement du dispositif, il serait plus commode de disposer d'au moins deux convergents et d'au moins deux ventilateurs comme suit.

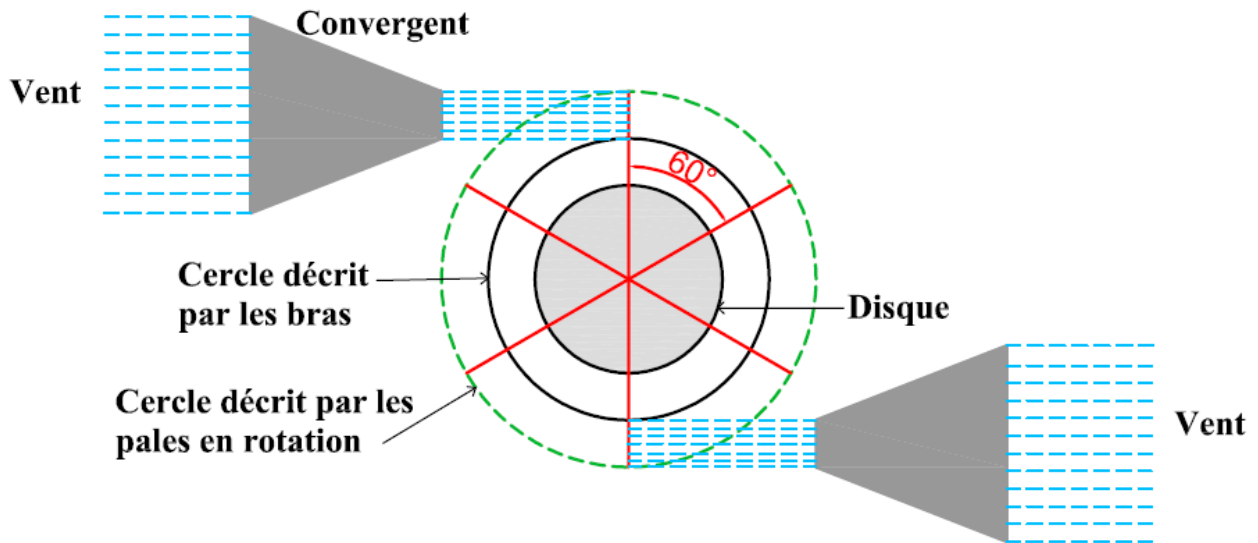


Figure 2.16: Disque portant six pales et mu par l'intermédiaire de deux convergents délivrant un débit provenant de deux ventilateurs

Cette configuration du dispositif (figure 2.16) double l'efficacité attendue du cas avec un seul convergent puisque, la pression dynamique s'exerce à chaque instant sur deux pâles. Dans ces conditions, le nombre de convergents à installer pourrait dépendre des considérations techniques et économiques en rapport avec le niveau satisfaction voulu.

5.2.5. Le choix du ventilateur

Le choix du ventilateur s'appuie sur deux données essentielles : le débit d'air imposé par la puissance à installer et la pression totale (somme de la pression statique et de la pression dynamique) qui représente la pression de l'état générateur (P_0). Une fois ces deux valeurs bien définies, il faudra se déporter vers les courbes proposées par les fabricants pour compléter les caractéristiques du ventilateur [38].

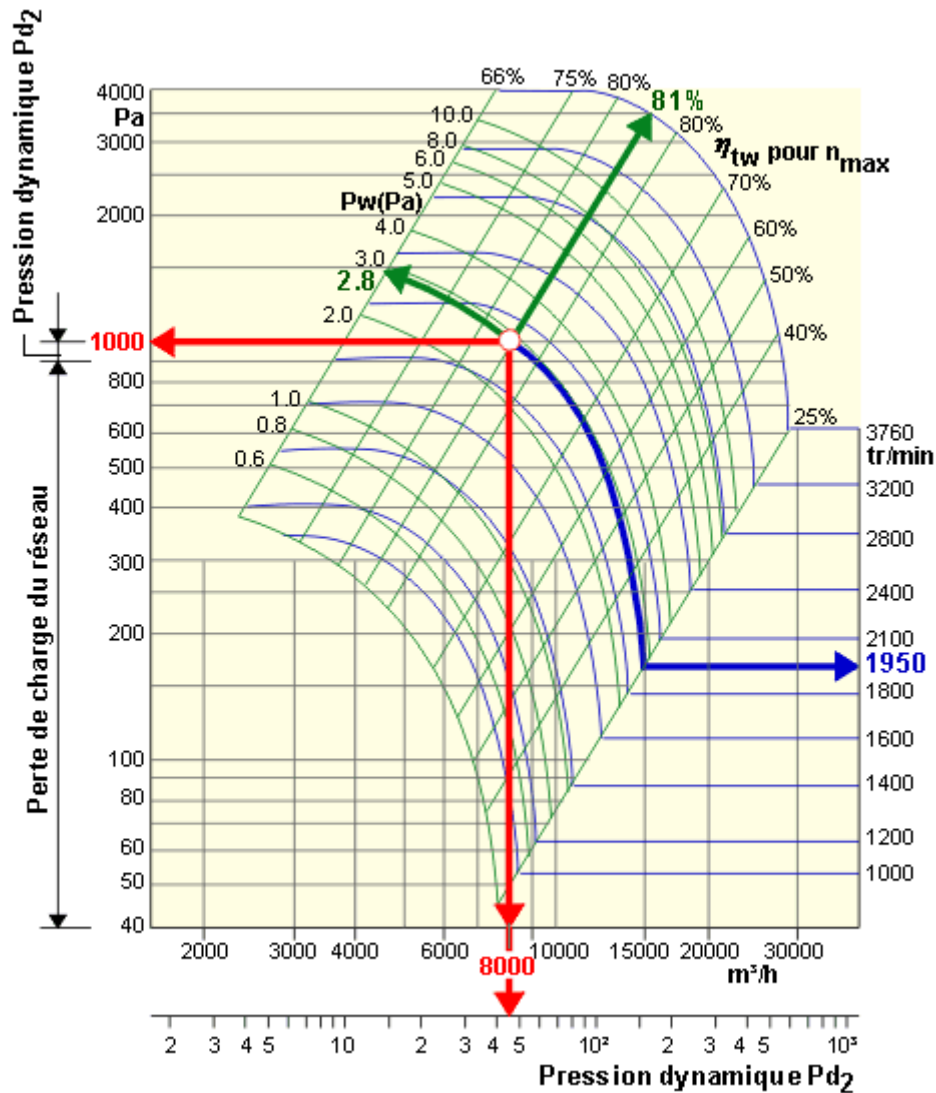


Figure 2.17: Courbe des caractéristiques d'un ventilateur [38]

Une fois le point de coordonnées débit-pression totale placé sur la courbe, il suffit de procéder à de simple lecture pour estimer la vitesse de rotation du ventilateur, la puissance absorbée par son moteur, mais également son rendement.

Il faut souligner que la courbe (figure 2.17) est réalisée pour une température de l'état générateur $T_0 = 20^\circ\text{C}$. Lorsque cette température dans une autre condition est différente de 20°C , il faudra, suivant les formules proposées par [38], reprendre le calcul de la pression totale et du rendement du ventilateur. Les autres données ne changent pas.

En fait, la pression totale résulte du calcul des pertes de charge totales du système utilisateur auquel le ventilateur est associé. Dans le cas qui concerne ce travail, les pertes singulières sont quasiment nulles (résultats empiriques sur les convergents), mais aussi les pertes linéaires, puisque, le travail dans cette partie, se mène sous le

sceau de fluide isentropique. De ce point de vue, le seul obstacle que le fluide rencontre dans son écoulement sera la pale disposée à la sortie de la petite section désormais appelée section critique.

En observant bien la courbe figure 2.17, il est remarquable qu'il peut être possible de jouer sur le débit ou la pression totale dans un but purement économique. En effet, se positionnant sur un débit donné, il peut être recherché au détriment de la pression totale un bon rendement de la soufflante et vice versa.

Pour conclure ce paragraphe, il est loisible de dire que la pression à considérer est $P_0 = F_{théo}/A$ (2.58). Ensuite, une fois la puissance à installer décidée, le débit à utiliser dans l'exercice peut être calculé à partir de (2.56). Par ailleurs, une température peut être prise $T_0 = 20^\circ\text{C}$, avec $\rho_0 = 1,25 \text{ kgm}^{-3}$.

Les autres considérations à savoir : la nature de la soufflante (radiale, axiale ou hélicoïdale), le type de moteur d'entraînement (accouplement direct ou entraînement par transmission avec arbre de transmission ; poulies et courroies) seront liées à la puissance à installer et à des raisons d'ordre technique et économique. Cependant, un ventilateur hélicoïdal est préférable puisque, étant donné sa forme, il serait plus facilement adaptable à la section d'entrée du convergent. Un entraînement par transmission pourrait permettre de faire varier le débit et par voie de conséquence, la puissance du dispositif.

5.2.6. Exemple de choix de ventilateur

Supposons que le débit volumique à délivrer soit $Q_v = 6000 \text{ m}^3/\text{h} \cong 2 \text{ m}^3/\text{s}$. Le coefficient de perte de charge dans un convergent droit dont l'angle au sommet est estimé à environ 25° est de l'ordre de 0,09. Les pertes de charge singulières à vaincre par le ventilateur pour fournir un tel débit sont estimées à 1141 Pa . Muni de ces paramètres, nous pouvons lire aisément sur l'abaque (Figure 2.20) les caractéristiques des ventilateurs. Ainsi la pression dynamique lue est d'environ 25 Pa . La pression totale à fournir par le ventilateur est donc de 1166 Pa . En plaçant le point de coordonnées (6000, 1166) sur l'abaque, on lit facilement la puissance du ventilateur qui doit être environ $2,5 \text{ kW}$, sa vitesse de rotation d'environ $1800 \text{ trs. min}^{-1}$ et avec un rendement de 80%.

5.3. Fonctionnement du dispositif avec l'air ambiant

En réalité, le dispositif dans sa version finale est muni de trois convergents (voir figure)

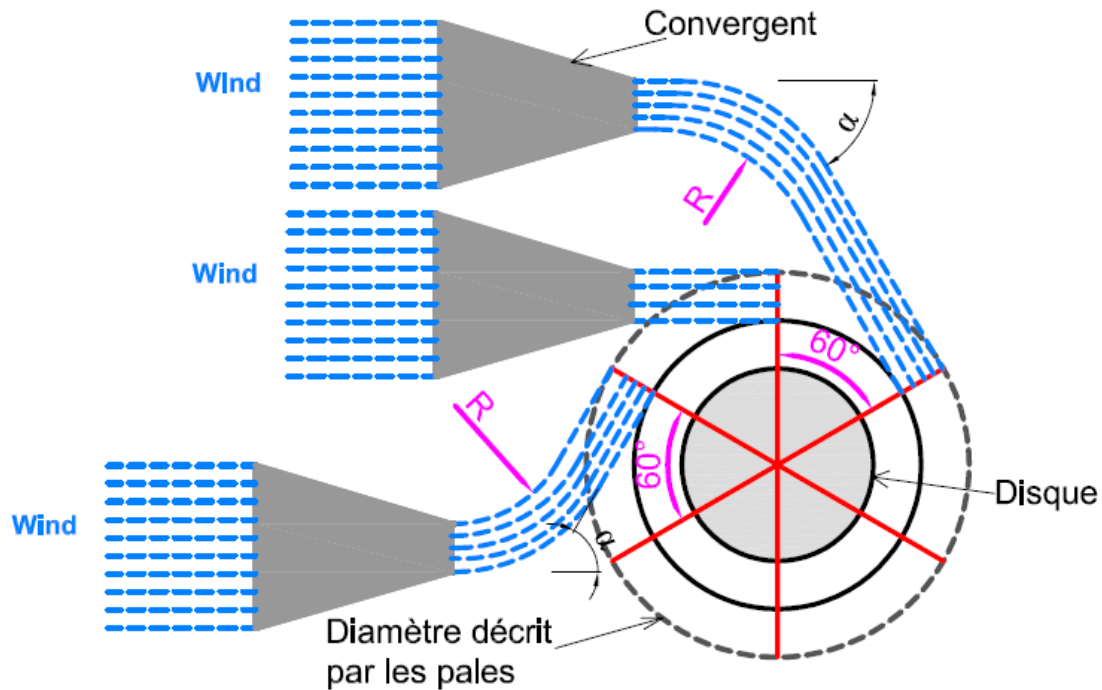


Figure 2.18: Schéma complet du dispositif éolien proposé.

Comme le montre la figure 2.18, le dispositif proposé est muni de 3 convergents dont un droit et deux portants des coudes à leur extrémité. L'évaluation de la puissance générée par le dispositif avec le convergent droit a fait l'objet d'une évaluation dans le paragraphe 5.2. Pour déterminer la puissance globale du dispositif, il reste à évaluer la puissance que pourraient générer les deux autres convergents. Si avec les valeurs empiriques, on estime que le convergent droit ne produit quasiment pas de perte, il n'en est pas de même pour les deux autres puisque les courbures génèrent inévitablement quelques pertes qu'il nous faut évaluer.

Les paramètres caractéristiques de ces courbures sont (voir figure 2.17) le rayon de courbure R et l'angle α que fait la tangente au bord de la courbure. On le sait, le coefficient de perte de charges singulières est donné par l'expression :

$$K = \frac{\alpha}{\pi} \left[0,131 + 1,847 \left(\frac{D}{R} \right)^{7/2} \right] \quad (2.68)$$

Il s'agit donc de trouver l'angle α et le rayon de courbure R qui minimise cette quantité.

À l'aide d'un programme Matlab, la courbe représentative de la variation du coefficient de perte de charge K est obtenue en fonction du rayon de courbure R pour un angle α fixé. Ces variations sont représentées dans les figures qui suivent.

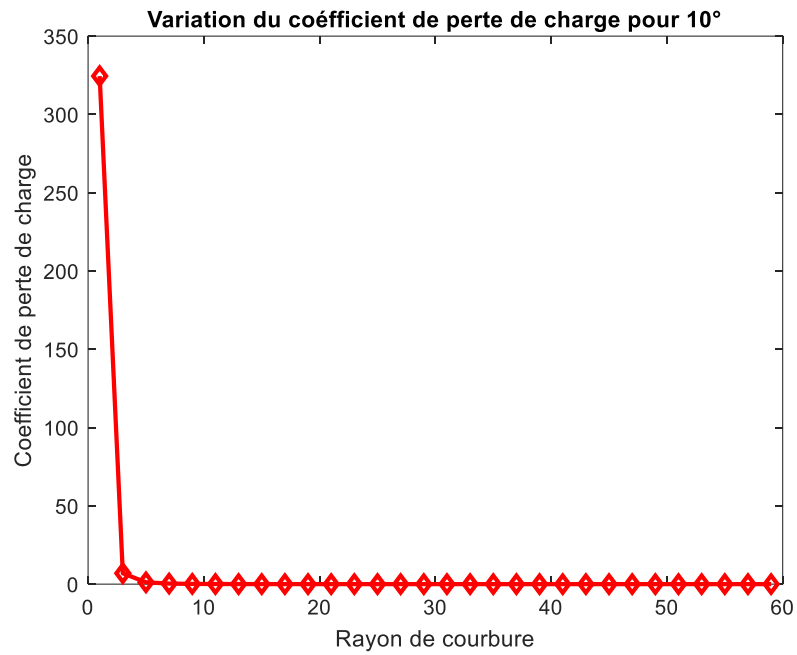


Figure 2.19: Variation du coefficient de perte de charge pour un angle $\alpha = 10^\circ$

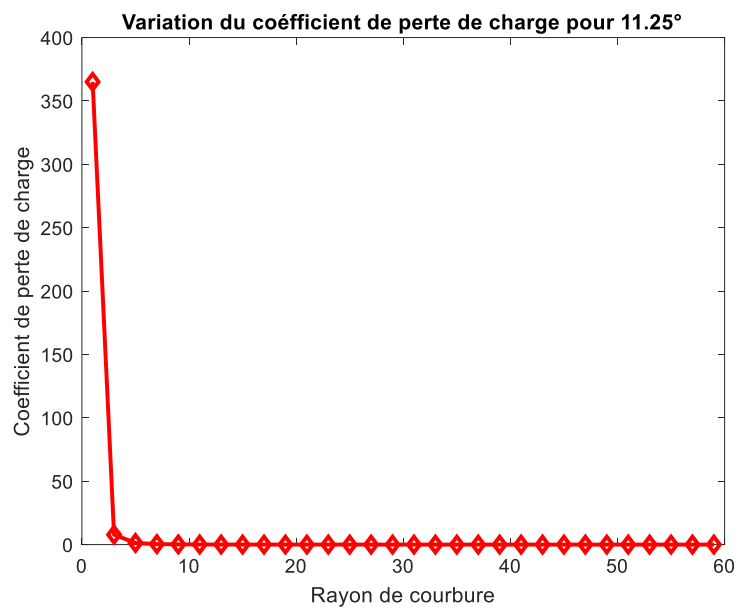


Figure 2.20: Variation du coefficient de perte de charge pour un angle $\alpha = 11,25^\circ$

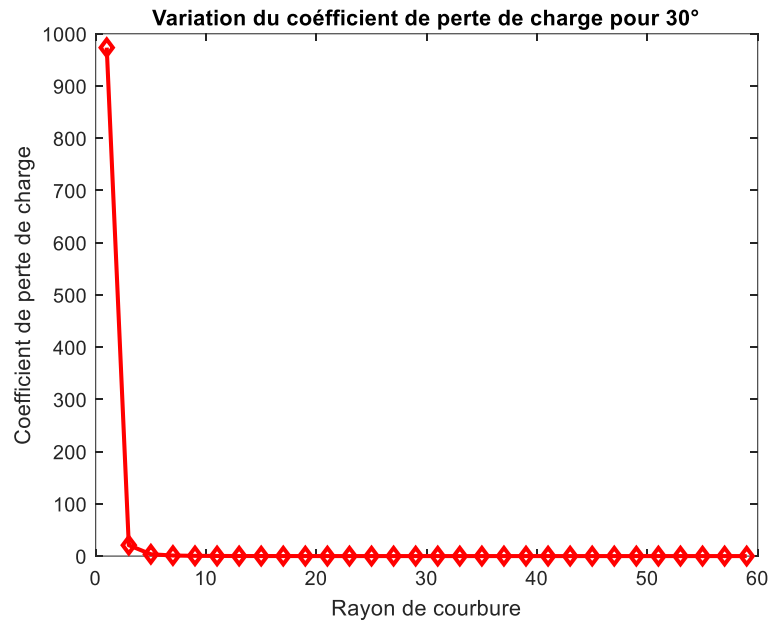


Figure 2.21: Variation du coefficient de perte de charge pour un angle $\alpha = 30^\circ$

En observant ces courbes, on constate qu'elles admettent toutes comme asymptote l'axe des abscisses. Les valeurs sont alors extraites par Matlab et présentées dans les tableaux suivants afin de permettre une meilleure lecture des courbes.

Tableau 2.3: Rayon de courbure et coefficient de perte de charge pour différentes valeurs de α

Angle 10° ou $\pi/18$											
R	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31	33
K	0,0482	0,0321	0,0233	0,0181	0,0149	0,0128	0,0114	0,0105	0,0097	0,0092	0,0088
Angle $11,25^\circ$ ou $\pi/16$											
R	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31	33
K	0,0543	0,0361	0,0262	0,0204	0,0168	0,0144	0,0129	0,0118	0,0110	0,0104	0,0100
Angle 30° ou $\pi/6$											
R	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31	33
K	0,1447	0,0963	0,0699	0,0544	0,0448	0,0385	0,0343	0,0314	0,0292	0,0277	0,0265

On peut remarquer que pour un rayon de courbure fixé, le coefficient de perte de charge croît avec l'angle. De même, pour un angle fixé, le coefficient de perte de charge décroît lorsque le rayon de courbure croît.

Le choix d'une configuration dépend des contraintes économiques, techniques et technologiques, mais surtout du niveau de perte de charge voulu.

Avec cette configuration des convergents, on peut estimer la puissance globale que fournit le dispositif à la sortie. Sachant que le convergent droit délivre une puissance

$\mathcal{P}_{théo}$, les convergents coudés délivreront donc une puissance $(1 - K)\mathcal{P}_{théo}$. La puissance globale du dispositif à la sortie sera donc :

$$\mathcal{P}_{glob} = (3 - 2K)\mathcal{P}_{théo} \quad (2.69)$$

Malgré tout, il faudra aussi tenir compte de l'intermittence du vent. C'est-à-dire, qu'il faudra que le système continue à tourner pendant un certain temps après une coupure brusque de la vitesse. La question d'un volant d'inertie est ainsi évoquée. Nous l'aborderons dans la suite du document.

5.4. Gain en énergie du dispositif

Le gain obtenu dans ce dispositif est surtout acquis au niveau du convergent où le rapport des puissances en entrée et en sortie est donné par l'expression :

$$\frac{\mathcal{P}_{théo_sortie}}{\mathcal{P}_{théo_entrée}} = \left(\frac{U^*}{U_0}\right)^2 \quad (2.70)$$

Cette équation (2.70) se justifie par le fait que le débit reste constant dans le convergent dès lors qu'on ne franchit pas le seuil du point critique. En effet, au-delà de ce point, les ondes de choc apparaissent et des discontinuités importantes s'observent dans la distribution des paramètres de l'écoulement.

En interprétant la courbe de la Figure 2.4, on se rend compte que pour le cas d'un écoulement subsonique qui fait l'objet de cette recherche, la quantité $\frac{U^*}{U_0}$ est supérieure à l'unité. Ce qui corrobore l'idée du gain de puissance.

En résumé, à la sortie du convergent, la puissance issue de l'état générateur est multipliée par le rapport (2.70). Les pertes de puissance ne s'observent qu'au niveau des dispositifs de transmission (poulie-courroie) et du générateur. Si les équipements de transmission et de conversion sont bien choisis, c'est-à-dire si l'on réussit à minimiser ces pertes, on peut espérer une puissance bien supérieure à la puissance d'entrée. Le système peut donc être regardé comme un multiplicateur de puissance. Autrement dit, on peut partir d'un ventilateur de puissance donnée, utilisée comme un état générateur, et générer une puissance supérieure. Dans le cas où l'état générateur est l'atmosphère, le gain est total puisque le système valorise les vitesses de vent faibles qui ne permettent pas l'amorçage des éoliennes classiques.

5.5. Pourquoi un disque d'une certaine masse dans le dispositif ?

Le système tournant autour de l'axe Δ est composé : du disque plein ; des barres (bras en fer torr) et des pâles en feuille de tôle d'épaisseur e_p .

Nous devons distinguer ici le système tournant librement et le système tournant couplé au générateur. Il s'agira d'évaluer les énergies nécessaires pour une rotation libre du système pendant un temps donné et celle nécessaire pour que le générateur tourne pendant le même temps. La masse à déterminer devra prendre en compte ces deux énergies pour que le système couplé puisse tourner dans le temps indiqué après arrêt brusque du vent.

a) Moment d'inertie du système libre

➤ *Le moment d'inertie d'un disque plein s'écrit :*

$$J_{\Delta} = \frac{1}{2} M R_D^2 \quad (2.71)$$

Δ : axe du disque et son axe de rotation, M : sa masse et R_D : son rayon.

Soit J_1 et J_2 , les moments d'inertie des barres et des pâles par rapport à l'axe Δ . Soit b le nombre de bras et donc aussi le nombre de pâles.

En mettant en œuvre le théorème de Huygens, il vient que :

➤ *Moment d'inertie des barres*

$$J_1 = b M_b \left[\frac{1}{12} l_b^2 + \left(\frac{1}{2} l_b + R_D \right)^2 \right] = b \rho_b l_b \left[\frac{1}{12} l_b^2 + \left(\frac{1}{2} l_b + R_D \right)^2 \right] \quad (2.72)$$

où ρ_b exprime une masse linéique (masse par unité de longueur).

➤ *Moment d'inertie des pâles*

$$J_2 = b \left[\frac{1}{2} M_p R_p^2 + (R_D + l_b + R_p)^2 M_p \right] = b \rho_p \pi R_p^2 e_p \left[\frac{1}{2} R_p^2 + (R_D + l_b + R_p)^2 \right] \quad (2.73)$$

Ainsi, le moment d'inertie $\mathfrak{J}_{\Delta}$ du système par rapport à l'axe Δ s'écrit :

$$\mathfrak{J}_{\Delta} = J_{\Delta} + J_1 + J_2 \quad (2.74)$$

b) Énergie cinétique

$$E_{\Delta} = \frac{1}{2} \mathfrak{J}_{\Delta} \cdot \omega^2 \quad (2.75)$$

c) Puissance absorbée par le système

$$P_r = \frac{1}{2} \mathfrak{J}_{\Delta} \cdot \alpha \cdot \omega \quad (2.76)$$

ω : vitesse angulaire en (rad/s) ; α : accélération angulaire en (rad/s^2) .

Remarquons déjà que $\omega = \Omega_D$ (2.59).

Lorsque la vitesse du vent devient nulle (le vent cesse de souffler), et ce qui est voulu, c'est qu'il tourne un certain nombre de fois (θ) avant que le vent ne se remette à souffler à nouveau.

En réalité, le disque massif n'a été pensé que pour une exposition du dispositif sur un site. En fait, l'idée est de pouvoir assurer une certaine continuité de la production d'énergie due au flux de vent, qui pourtant est intermittent. Ce problème peut-être tout au moins partiellement résolu, si l'amplitude (a_m) entre les vitesses angulaires faibles ($\omega_f = \text{Omegaf}$) et moyennes ($\omega_m = \text{Omegm}$) dans une région d'implantation d'un site est connue.

Si le système doit rester en marche après que le vent soit coupé jusqu'à ce que le vent reprenne à souffler, c'est que dans un mouvement uniformément varié, il va passer de la vitesse angulaire faible (ω_f) à la vitesse angulaire moyenne (ω_m) ou le nombre de tour (θ) pourrait être atteint. La situation qui vient d'être décrite se traduit par :

$$\omega_m^2 - \omega_f^2 = 2. \alpha. \theta \quad (2.77)$$

De même,

$$a_m = \omega_m - \omega_f \quad (2.78)$$

Où a_m désigne l'amplitude des vitesses de rotation.

Par combinaison des formules (2.76) et (2.77), la formule (2.76) s'écrit sous la forme :

$$P_r = \frac{1}{2} \mathfrak{J}_\Delta. \alpha. \omega = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} M R_D^2 + J_{1+2} \right) . \omega_m . \left[\frac{a_m (2. \omega_m - a_m)}{2. \theta} \right] \quad (2.79)$$

Avec $J_{1+2} = J_1 + J_2$

Ainsi, la masse convenable du disque porte – pales qui pourrait assurer la continuité de sa rotation serait :

$$M(R_D, \theta) = \frac{2}{R_D^2} \left[\frac{4. \theta. P_r}{\omega_m. a_m (2. \omega_m - a_m)} - J_{1+2} \right] \quad (2.80)$$

Supposons connu le temps maximum t_m que met le vent pour reprendre après une rupture. Ce temps correspond donc nécessairement à celui que met le vent pour couvrir l'amplitude. Ainsi, l'équation du mouvement du système pourrait s'écrire :

$$\theta = \frac{1}{2} \alpha t^2 + \omega_f. t \quad 0 \leq t \leq t_m \quad (2.81)$$

Alors $\omega = \alpha t + \omega_f$; $\omega_m = \alpha t_m + \omega_f$ et $\alpha = (\omega_m - \omega_f)/t_m$

Ainsi,

$$\theta = \frac{1}{2} t_m a_m + \omega_f \cdot t_m$$

Dans ces conditions, on peut exprimer aisément la masse du disque porte-pâles comme suit :

$$M(R_D, \theta) = \frac{4}{R_D^2} \left[\frac{(t_m a_m + 2\omega_f \cdot t_m) \cdot P_r}{\omega_m \cdot a_m (2 \cdot \omega_m - a_m)} - J_{1+2} \right] \quad (2.83)$$

Les paramètres ω_m , ω_f et t_m peuvent être estimés à partir des données statistiques relatives à un site d'implantation probable du système éolien. En effet, si les données météorologiques d'un site qui n'a pas subi de modification sur une longue période sont disponibles, il serait possible d'estimer les vitesses angulaires moyenne et faible ainsi que le temps moyen de reprise du vent après une rupture. Les vitesses linéaires moyenne et faible recueillies peuvent être rapportées au diamètre du disque pour déterminer celles angulaires. Ainsi donc la masse du disque serait convenablement calculée en tenant compte des comportements environnementaux du site. Bien entendu le moment d'inertie J_{1+2} pourrait être calculé à l'issue d'un choix des bras et de la pale.

Cependant, il faudra rajouter à cette masse une certaine quantité qui prendrait en compte la puissance nécessaire en ces moments-là pour faire tourner le générateur, c'est-à-dire le système couplé lorsque la vitesse angulaire est ω_f . Tous les équipements rotatifs électriques fournissent une puissance résiduelle après coupure du courant. Cette puissance résiduelle correspond à celle qu'ils déploient pour vaincre les résistances internes (bobinage) et continuer à tourner. Il suffira de convertir cette énergie en énergie cinétique de rotation pour estimer la masse nécessaire à cet effet. Cette masse devra être rajoutée à la masse du disque estimée dans l'équation (2.83). Il est à noter que, le P_r relève d'un prélèvement de la puissance théorique en sortie du convergent. Raisonnablement le P_r devrait être choisi égale à la puissance d'amorçage du système éolien.

6. Conclusion

Dans ce chapitre, un focus sur les propriétés des fluides compressibles et des lois qui régissent leur écoulement a été présenté. Il a été question de démontrer par un raisonnement mathématique cohérent le choix de l'accélérateur de flux et de fixer ces limites de fonctionnement pour ne pas tomber dans les problèmes de couches limites et d'ondes de choc.

Le choix s'est porté sur un convergent avec une section de sortie minimale. Le modèle mécanique a été créé sur SolidWorks et son analyse de performance a été faite avec

Autodesk CFD. Ainsi on observe par suite des simulations numériques, une grande multiplication de vitesse à la sortie par rapport à la vitesse d'entrée. Ce qui est très satisfaisant par rapport aux résultats souhaités.

Ces paramètres de sortie du convergent, lorsqu'ils sont combinés à une éolienne, produiront un rendement mécanique plus élevé, ce qui améliore considérablement la production d'énergie électrique.

Un schéma de prototype éolien innovant a été proposé pour recevoir le convergent. Ce prototype est simulé sur Matlab suivant des paramètres dimensionnels tels que le rapport des diamètres des poulies, et des paramètres d'entrée tels que la vitesse du gaz de service et le nombre de Mach. Les résultats obtenus restent très satisfaisants.

Ce prototype sera l'objet du chapitre suivant. Il sera question de faire sa modélisation mécanique, son analyse fonctionnelle, son dimensionnement et le choix de matériaux pour sa réalisation.

CHAPITRE 3 : CONCEPTION DU MODÈLE ET RÉALISATION DU PROTOTYPE

1. Introduction

Le chapitre précédent a défini le schéma de principe et de fonctionnement du dispositif éolien, la forme des accélérateurs de flux choisis (convergents), et les conditions appropriées d'utilisation de certains composants pour atteindre les performances voulues.

Il s'agit maintenant de concevoir l'ensemble de l'éolienne, c'est-à-dire d'identifier ses différents composants, de déterminer la forme la plus adaptée, et enfin d'établir la manière dont ces composants vont être assemblés entre eux. De plus, pour assurer une bonne tenue mécanique des différentes pièces, il est nécessaire d'effectuer des calculs dimensionnels. Ceux-ci dépendent principalement des forces mises en jeu, de la géométrie et des matériaux utilisés.

Il est important de noter que cette partie du travail consiste en la modélisation et l'expérimentation d'un prototype éolien qui peut être reproduit facilement. Par conséquent, il est essentiel d'utiliser des composants et des matériaux standards qui sont couramment disponibles.

Le schéma cinématique du prototype est présenté sur la figure 3.1. À partir de ce schéma, l'ensemble des calculs de conception et le choix des matériaux pour les différents composants sont détaillés dans la suite du chapitre.

Les principaux composants étudiés sont l'axe de rotation du disque, les roulements et le système de transmission de mouvement et de puissance.

A la fin, l'aspect économique du dispositif ainsi que de son impact environnemental sont abordés et discutés. Cette analyse se base sur le modèle réalisé, et non sur l'évaluation d'un parc éolien complet. Une comparaison basée sur le prix du marché de quelques éoliennes et les émissions nocives de certains systèmes de production d'électricité est faite pour situer le prototype réalisé.

2. Schéma cinématique du modèle

Un schéma cinématique est une représentation simplifiée et codée d'un mécanisme qui ne tient pas compte des formes ou des dimensions du mécanisme et fait l'objet d'une norme. C'est un outil d'analyse fonctionnelle qui traduit facilement les performances cinématiques d'un mécanisme et est utilisé en :

- analyse pour comprendre rapidement le fonctionnement ;
- conception pour exprimer rapidement des solutions techniques liées à la fonction de service.

Pour le schéma de principe du prototype éolien défini, 3 classes d'équivalence sont distinguées. Il s'agit du bloc disque comprenant les bras, les pales et l'axe ; le bloc de transmission de mouvement poulie courroie et le bloc du générateur.

Le principe de fonctionnement du dispositif est présenté dans le chapitre 3. Le premier bloc qui initie le mouvement est le bloc A, composé du disque cylindrique, des bras et des pales tous solidaires d'un axe de rotation. Ce mouvement de rotation est transmis au bloc de transmission C qui se compose des deux poulies et de la courroie. Enfin la rotation est transmise au bloc générateur B par le biais de la petite poulie solidaire de son axe.

Le schéma cinématique du dispositif se présente comme indiqué dans la figure ci-dessous.

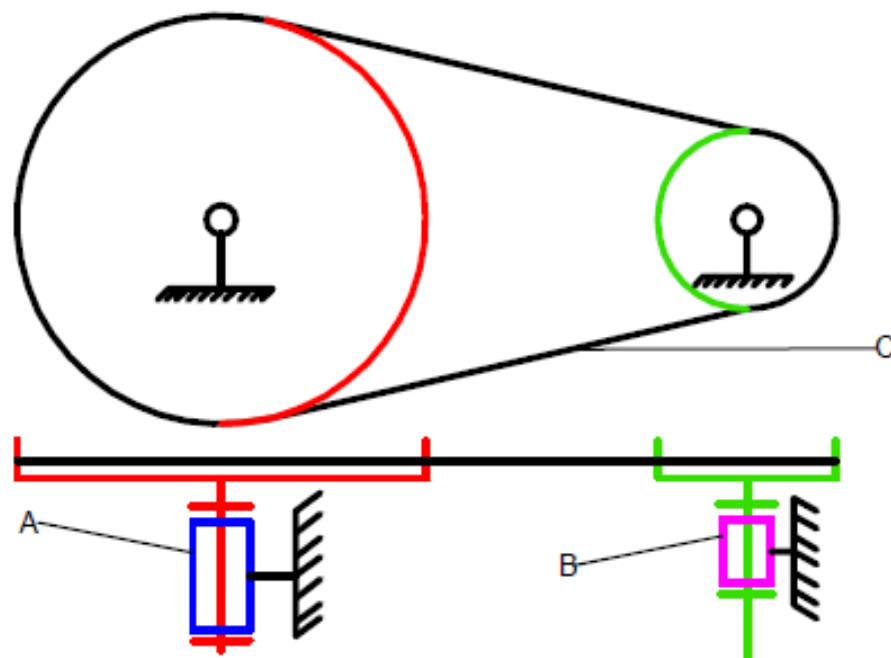


Figure 3. 1: Schéma cinématique avec les différentes classes d'équivalence

3. Calcul des différents éléments

3.1. Calcul de l'axe du disque

L'axe du disque a pour fonction de transmettre le couple produit par les pales à la génératrice. Il est donc essentiel que cet arbre soit lié en rotation à la génératrice.

En fonctionnement, l'axe de rotation est soumis aux sollicitations suivantes :

- Flexion due à la force du vent et aux poids du disque et des éléments assemblés dessus ;

- Torsion due au couple moteur généré par les pales et au couple résistant du générateur.

3.1.1. Dimensionnement statique

Cette démarche a pour objectif de garantir que l'effet des contraintes sur le matériau ne mènera pas à des déformations plastiques. Il est donc primordial que la contrainte maximale reste inférieure à la limite d'élasticité du matériau.

$$\sigma_{pe} = \frac{R_e}{K_s} \quad (3.1)$$

- R_e : la limite d'élasticité du matériau,
- K_s : coefficient de sécurité,
- σ_{pe} : la contrainte pratique à l'extension du matériau

Le coefficient de sécurité pour la conception d'objets fonctionnant dans un environnement ordinaire et dont les efforts et contraintes peuvent être déterminés est généralement pris égal à 2 [79]. Le matériau choisi pour l'axe est l'acier allié de limite élastique $R_e = 350 \text{ MPa}$.

3.1.2. Calcul des contraintes

Le cas le plus défavorable peut être ramené à un problème statique en deux dimensions d'une poutre qui repose sur deux appuis tel que celui de la figure 3.2. Les forces sont considérées comme ponctuelles.

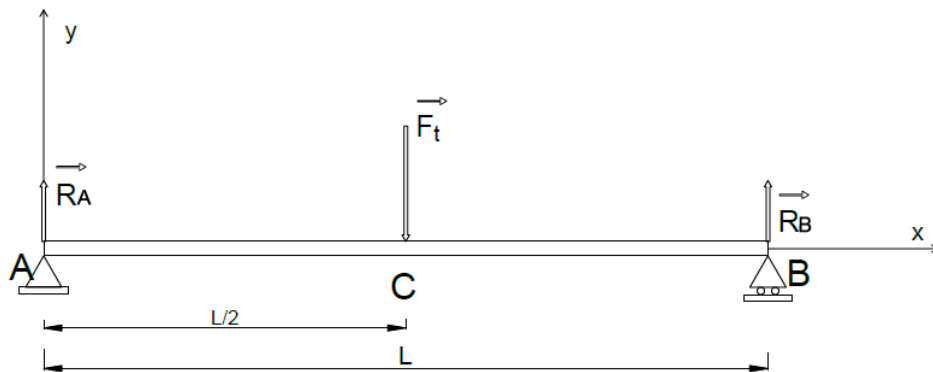


Figure 3. 2: Schéma des forces agissant sur l'axe

La force répartie sur les pales est due au vent et s'exprime suivant l'équation :

$$F = \frac{1}{2} V_{\infty max}^2 \times \rho \times A \quad (3.2)$$

avec :

- $V_{\infty max}$: la vitesse maximale du vent, que l'on peut considérer égale à 25 m.s^{-1} ;

- ρ : la masse volumique de l'air = 1.25 kg.m^3 ;
- A : la surface sur laquelle agit le vent estimée à $0,0314 \text{ m}^2$.

On trouve $F = 12,26 \text{ N}$

Cette force F rentre en compte dans le calcul de l'arbre à la fatigue. Mais étant donné qu'elle est très petite comparée aux sollicitations que subit l'axe, on peut calculer l'axe aux charges les plus élevées et conclure.

Les deux appuis A et B représentent les deux roulements, positionnés en tenant compte de la longueur totale de l'axe (750mm). Comme nous raisonnons en statique, les sommes de forces et de moments de forces s'annulent. Les réactions aux appuis peuvent alors être calculées. Les réactions $\vec{R}_A$ et $\vec{R}_B$ aux appuis équilibrent la force $\vec{F}_t$ qui symbolise ici la somme de la force $\vec{F}$ et les poids du disque, des bras et des pales. On peut poser :

$$\begin{cases} \sum \vec{F}_{ext} = \vec{0} \\ \sum \vec{M}_{/A} = \vec{0} \end{cases} \quad (3.3)$$

La masse de l'ensemble disque, bras et pales est estimée à $m = 25 \text{ kg}$ et en prenant pour accélération de la pesanteur $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$, les réactions aux appuis sont déterminées et valent $R_A = R_B = 122,625 \text{ N}$

La contrainte de flexion sur l'axe du disque est donnée par :

$$\sigma_{max} = \frac{M_{fmax}}{I_{gz}/y_{max}} \leq \sigma_{pe} \quad (3.4)$$

avec I_{gz}/y_{max} : module de flexion

Il s'en suit :

$$M_{fmax} = F \times \frac{L/2 \times L/2}{L} = 22992,18 \text{ N.m} \quad (3.5)$$

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{32 \times M_{fmax} \times K_s}{R_e \times \pi}}$$

On trouve $d \geq 11,02 \text{ mm}$

Le couple C_{pal} exercé sur l'axe de rotation peut être obtenu à partir de la vitesse de rotation du disque et de la puissance que produit le dispositif. Ce couple permet ensuite de calculer la contrainte de torsion.

$$C_{pal} = \frac{P}{\omega} = \frac{10 \times 10^3}{2\pi/60 \times 800} = 119,42 \text{ Nm} \quad (3.6)$$

La puissance $P = 10 \text{ Kw}$ représente la puissance souhaitée du générateur à faire tourner à sa vitesse nominale.

La vitesse de rotation souhaitée sur l'axe du disque est de $600 \text{ trs. min}^{-1}$. Elle est majorée à $800 \text{ trs. min}^{-1}$ pour anticiper les pertes.

Ainsi, la contrainte de torsion peut être calculée à partir de l'expression (3.7).

$$\tau_{torsion} = \frac{16 \times C_{pal}}{\pi \times d^3} \quad (3.7)$$

La condition de résistance pour la sollicitation en torsion est donnée par :

$$\tau_{max} \leq \sigma_{pg} \quad (3.8)$$

avec σ_{pg} : Résistance pratique au cisaillement.

En utilisant le critère de Tresca qui donne $\sigma_g = \frac{R_e}{2}$

On trouve :

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{16 \times C_{pal} \times K_s \times 2}{R_e \times \pi}} \quad (3.9)$$

$$d \geq 19,08 \text{ mm}$$

Pour tous les calculs précédents, prendre les valeurs de $R_e = 350 \text{ MPa}$ et $K_s = 2$

La valeur du diamètre de l'axe du disque est choisie en majorant les valeurs calculées.

Pour des mesures de sécurité, le diamètre est pris égal à 20 mm

3.2. Calcul du système de transmission retenu

Le système de transmission poulie-courroie pour la transmission de puissance entre l'axe du disque et l'axe du générateur est retenu. Ceci en raison de l'élasticité de la courroie en caoutchouc qui absorbe les chocs et les vibrations rendant la transmission silencieuse et sans lubrification.

➤ **Choix du type de courroie**

Le choix s'est porté sur une courroie trapézoïdale de type XPZ montée en transmission simple par adhérence, car elle permet une transmission des vitesses circonférentielles élevées. Son rendement est 0,95 et sa masse linéique $0,069 \text{ kg/m}$.

➤ **Données :**

- ✓ Puissance nominale du moteur : $P_n = 10 \text{ Kw}$
- ✓ Conditions de fonctionnement : $C_f = 16 \text{ h/jr}$ en atmosphère normale
- ✓ Fréquence de rotation de la petite poulie : $N_{pp} = 1440 \text{ trs/min}$

✓ Entraxe approximatif : $e' = 600 \text{ mm}$

➤ **Choix de la section :**

Les conditions de fonctionnement sont de 16 h/jr avec un moteur électrique usuel, à couple de démarrages variables. Ainsi d'après [80] (voir annexe 4) le facteur k choisi est : 1,25.

Dans ces conditions la puissance de calcul devient :

$$\begin{aligned} P_c &= k P_n \\ P_c &= 1,25 \times 10 \\ P_c &= 12,5 \text{ kW} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Connaissant la puissance de calcul et la fréquence de rotation de la petite poulie, l'exploitation de [80] (voir annexe 4) conduit au choix d'une section de courroie et on trouve : $S_c = 50 \text{ mm}$

➤ **Choix des diamètres des poulies :**

Le choix des diamètres des poulies se fait en tenant compte d'un diamètre aussi grand que possible pour limiter la tension dans les courroies et une vitesse linéaire de la courroie inférieure à une valeur limite (40 m.s^{-1}).

La valeur 40 m.s^{-1} est la vitesse maximale recommandée pour la courroie trapézoïdale afin d'avoir un équilibrage soigné de l'ensemble tournant [80].

Choix des diamètres :

- ✓ Diamètre de la grande poulie : $D = 600 \text{ mm}$
- ✓ Diamètre de la petite poulie : $d = 200 \text{ mm}$

Ainsi la vitesse linéaire de la courroie devient :

$$V_l (\text{m.s}^{-1}) = \frac{\pi N_d \times d}{60} \quad (3.11)$$

La vitesse linéaire obtenue est de 15 m.s^{-1} , bien inférieure à la valeur limite de 40 m.s^{-1} .

Les diamètres des poulies étant connus, nous pouvons déduire le rapport de transmission qui est de 3 à partir de l'expression (3.12).

$$R_t = \frac{D}{d} \quad (3.12)$$

➤ **Calcul de la longueur des courroies**

L'entraxe souhaité est de 600 mm, ce qui conduit à une longueur de courroie théorique :

$$L_c' \approx 2e' + \frac{(D - d)^2}{4e'} + \pi \left(\frac{d + D}{2} \right) \quad (3.13)$$

$$L_c' \approx 2 \times 600 + \frac{(600 - 200)^2}{4 \times 600} + \pi \left(\frac{200 + 600}{2} \right)$$

$$L_c' \approx 2522,66 \text{ mm}$$

Ainsi la longueur de référence standard choisie est $L_c = 2650 \text{ mm}$, ce qui donne un entraxe réel de :

$$e = e' + \frac{L_c - L_c'}{2} \quad (3.14)$$

$$e = 663,67 \text{ mm}$$

➤ Nombre de courroies

De l'exploitation de [80, pg 16], la puissance brute transmissible par courroie est obtenue, dans les conditions de référence $\alpha = 180^\circ$ et de longueur de base de 2650 mm. Ainsi il est souhaitable de corriger la puissance brute par les facteurs d'arc a et de longueur C_l comme suit :

$$a = \frac{D - d}{e} = 0,6 ; P_b = 10 \text{ kW} ; C_l = 1,9$$

D'où le nombre de courroies :

$$N_{th} = \frac{P_c}{P_b \times C_l \times a} \quad (3.15)$$

$$N_{th} = 1,1$$

Donc le nombre de courroie susceptible de transmettre la puissance voulue sera pris égale à 2.

3.3. Calcul des roulements

3.3.1. Critères de choix

Les roulements ont pour objectif de maintenir l'arbre en position tout en lui permettant de tourner suivant son axe de rotation. Ils doivent être choisis en fonction des critères suivants [81] :

- Espace disponible : L'axe ayant une longueur limitée, la dimension axiale ne doit pas être trop grande.
- Charge : Les roulements seront soumis à une charge radiale élevée qui dépend de la vitesse du vent ainsi qu'à une charge axiale modérée.

- Déversement admissible : Un fléchissement de l'arbre sous sa charge ou à cause d'un mauvais alignement des roulements peut entraîner un défaut d'alignement entre l'arbre et le logement.
- Précision : Dans notre cas d'étude, l'éolienne n'exige pas une grande précision.
- Vitesse admissible : La vitesse de rotation souhaitée se situe autour de 800 tours par minute. Ces conditions n'entraînent pas une augmentation de la température de fonctionnement.
- Silence de fonctionnement : Des roulements aussi silencieux que possible sont souhaités pour répondre à la problématique de bruit généré par les éoliennes classiques.
- Rigidité : Une légère déformation du roulement n'aurait pas d'effet sur le fonctionnement du système.
- Possibilité de déplacement axial : le choix devrait être fait de sorte que l'axe ne subisse pas de déplacement axial.
- Montage et démontage : La maintenance des roulements se fait de manière simple.
- Étanchéité : Dans des conditions réelles de fonctionnement, l'étanchéité des roulements aura un impact sur les performances et la durée de vie du système.
- Prix : L'objectif est de pouvoir reproduire le dispositif éolien avec peu de moyens, aussi bien techniques qu'économiques.

En exploitant le tableau suivant reprenant quelques éléments de la matrice du catalogue SKF [81], l'utilisation de roulements rigides à billes est la plus appropriée.

Tableau 3.1:Types de roulements et caractéristiques

	Charge radiale	Charge axiale	Charge combinée	Vitesse élevée	Bruit	Prix
Rigide à billes	+	+	+	+++	+++	+++
À rouleaux coniques	++	++	+++	+	+	-
À rouleaux cylindriques	++	--	--	++	++	++

Symboles : +++ = excellent ; ++ = bon ; + = correct ; - = mauvais ; -- = inapproprié.

On remarque déjà dans ce tableau que les roulements à billes ne comportent pas de signe (-) dans les différentes colonnes. De plus, ils l'emportent sur les facteurs recherchés ici : la vitesse élevée, le bruit, le prix et la charge radiale correcte.

3.3.2. Montage

Une règle générale de montage des roulements consiste à réaliser un ajustement serré sur la bague du roulement qui tourne par rapport à la charge radiale. Dans notre cas

de montage, on a un arbre tournant supportant la masse du disque, des bras et des pales. Il faut donc serrer la bague intérieure pour assurer un meilleur guidage en rotation.

Le maintien axial de l'arbre est quant à lui effectué en deux points uniquement, de manière à former un montage isostatique. Les roulements sont logés dans leur palier et boulonnés à un élément fixe qui est le bâti. Ces paliers constituent le support nécessaire pour l'arbre et déterminent son alignement.

3.3.3. Dimensionnement

Se référant au diamètre de l'axe et du type de roulement, nous avons retenu un roulement rigide à billes SKF 6004 représenté dans la figure ci-bas.

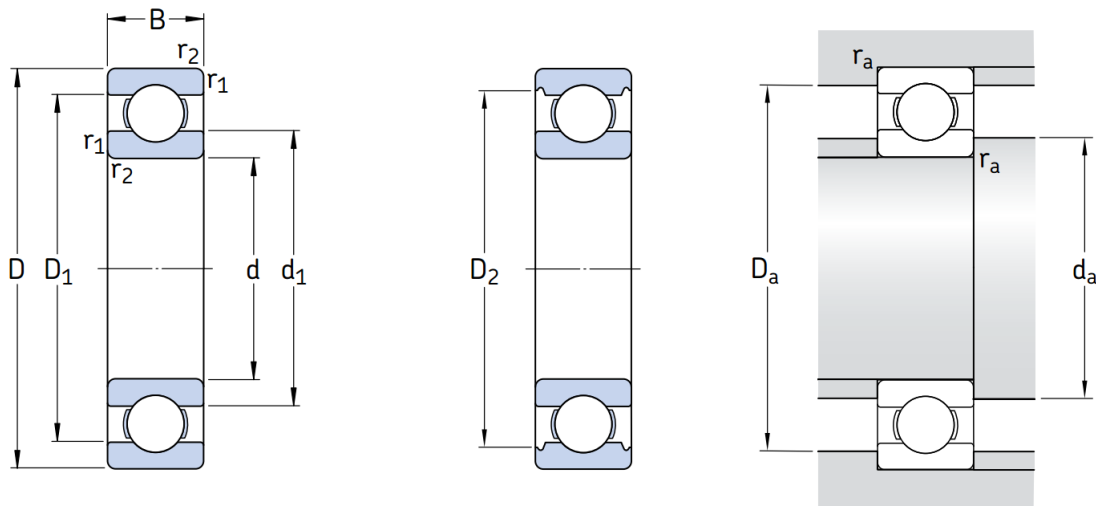


Figure 3. 3: Roulement à une rangée de billes SKF 6004 [41,43]

Les caractéristiques principales de ce roulement sont :

$$D_1 = 47 \text{ mm}; B = 14 \text{ mm}; d = 20 \text{ mm}; C = 12,7 \text{ kN}$$

Il s'agit maintenant de vérifier si la charge dynamique de base C , est convenable pour garantir une durée de vie raisonnable du montage. Dans le cas d'une machine qui fonctionne 8 heures par jour, les travaux de Juvinall [82] proposent un dimensionnement de roulements pour une durée de vie de 20 000 heures. Cette durée de vie varie en fonction de la charge appliquée selon l'équation (3.16):

$$L = K_r \cdot L_R \left(\frac{C}{F_e} \right)^p$$

Cette équation se met sous la forme :

$$C = F_e \left(\frac{L}{K_r \cdot L_R} \right)^{1/p} \quad (3.17)$$

Avec :

- L : durée de vie estimée en nombre de tours. Dans le cas critique, 20000 heures de fonctionnement correspondent à 840×10^6 tours.
- K_r : facteur de fiabilité égal à 1 lorsqu'une fiabilité de 90% est souhaitée.
- L_R : durée de vie pour une charge égale à la charge dynamique de base. $L_R = 10^6$ tours pour les roulements du catalogue SKF [81].
- F_e : la charge radiale équivalente appliquée au roulement (en kN).
- $p = 3$ pour les roulements à billes.

Après calcul, on trouve $C = 4,76 \text{ kN}$, ce qui est nettement inférieur à la charge dynamique de base du roulement choisi.

Somme toute, pour une durée de fonctionnement journalier de 8h, la durée de vie du roulement est d'environ 2 ans. Cependant, le calcul précédent concernant la courroie prévoit une durée de fonctionnement de 16h par jour. Ainsi, les roulements dans ces conditions pourront tenir un peu plus d'un an.

4. Montage final du dispositif

4.1. Modèle mécanique d'ensemble

Les montages du dispositif pour la simulation et pour l'environnement ambiant sont présentés dans les figures qui suivent.

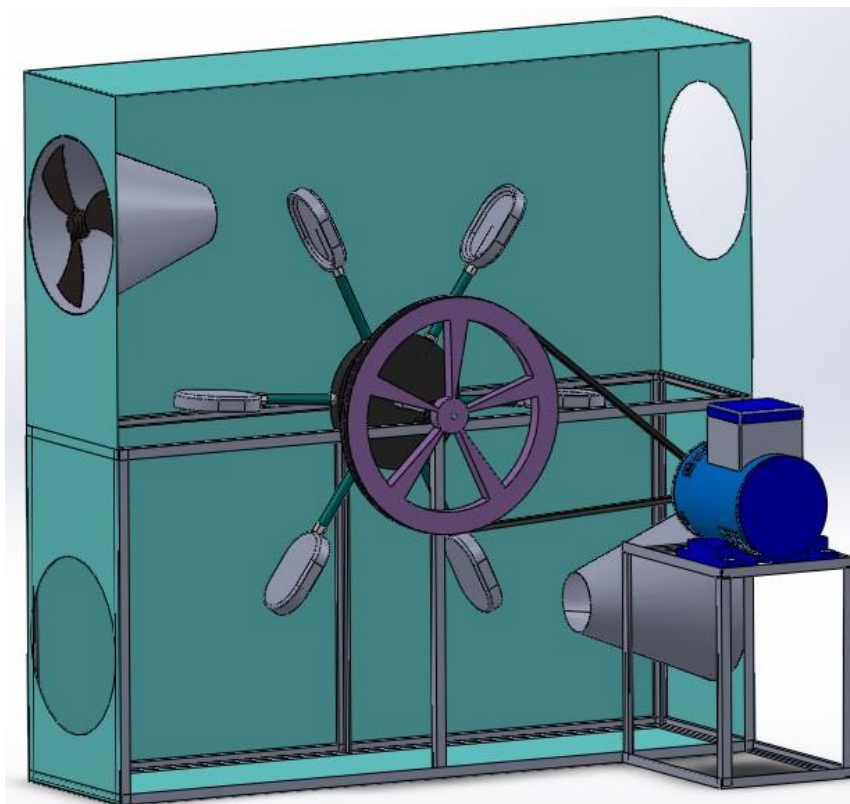


Figure 3. 4: Dessin d'ensemble du dispositif de simulation

Le dispositif de simulation dont le fonctionnement est détaillé dans le chapitre précédent utilise deux ventilateurs disposés perpendiculairement aux pales pour exercer une pression dynamique maximale sur ces derniers. L'utilisation de deux ventilateurs est retenue pour, qu'à chaque instant t , que l'une des pales soit dans le champ du flux. Ce dispositif est utilisé comme multiplicateur de puissance.

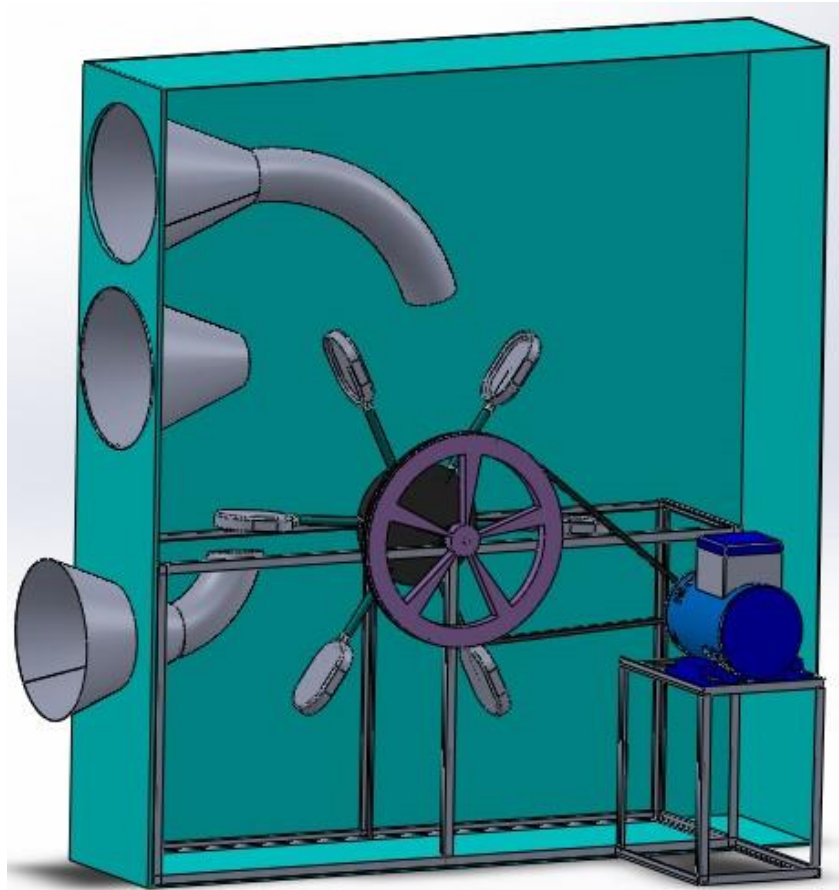


Figure 3. 5: Dessin d'ensemble du dispositif pour exposition ambiante

En ce qui concerne le dispositif de la figure 3.5, il est utilisé en environnement libre et doit être orienté suivant la direction dominante du vent afin de produire la puissance électrique estimée au paragraphe 3 du chapitre précédent. La disposition des trois convergents est choisie de telle sorte que trois pales, à chaque instant t , soient dans le champ du flux de vent. À la sortie de chaque convergent, on obtient une vitesse U^* , bien supérieure à la vitesse d'entrée et dépendant de la nature du gaz donnée par l'expression (2.51).

4.2. Bilan énergétique du dispositif éolien

Faire le bilan énergétique du dispositif revient à définir son rendement mécanique global en fonction des composants utilisés. Les principaux composants susceptibles de produire des pertes sont le système de transmission et l'alternateur.

Le système de transmission choisi est une transmission par poulie-courroie de type trapézoïdale *XPZ* de rendement $\eta_c = 0,95$. Le système de conversion électrique utilisé est un alternateur synchrone de commerce de type standard, avec une puissance de 10 kW , une vitesse nominale de $1500\text{ trs. min}^{-1}$, de fréquence 50 Hz et de rendement en régime nominal $\eta_g = 0,9$.

Le rendement des roulements rigides à billes 6004 est de 0,9.

Le rendement global du dispositif peut donc être estimé égal à :

$$\eta_{global} = \eta_c \times \eta_g \times \eta_R \quad (3.18)$$

En valeur numérique et en relation avec notre cas de réalisation, on trouve :

$$\eta_{global} = 77\%$$

Les pertes enregistrées le sont par rapport à la puissance récupérable, c'est-à-dire en sortie du convergent. Or, ce dernier a multiplié la puissance en entrée dans le dispositif. On peut donc penser que, toute proportion gardée, il n'y a grand-chose de perdu par rapport à la puissance en entrée du dispositif.

5. Fabrication du prototype

(voir en annexe 5) les dessins de définition de chacun des composants du prototype réalisé)

— Les convergents

Ils sont fabriqués avec de la tôle galvanisée pour minimiser le frottement de l'air sur les parois. Le processus de fabrication se résume à la découpe de la tôle aux dimensions appropriées et à son roulage pour obtenir la forme circulaire aux diamètres. La soudure par point permet d'assembler les deux extrémités de la tôle et ainsi obtenir la forme tronconique.

Pour les convergents munis de bout coudé, le principe de réalisation reste le même. La partie coudée s'obtient par petite découpe successive de la tôle pour obtenir le rayon de courbure (voir tableau 2.4, 2.5 et 2.6) et à la fin, elle est roulée et soudée.

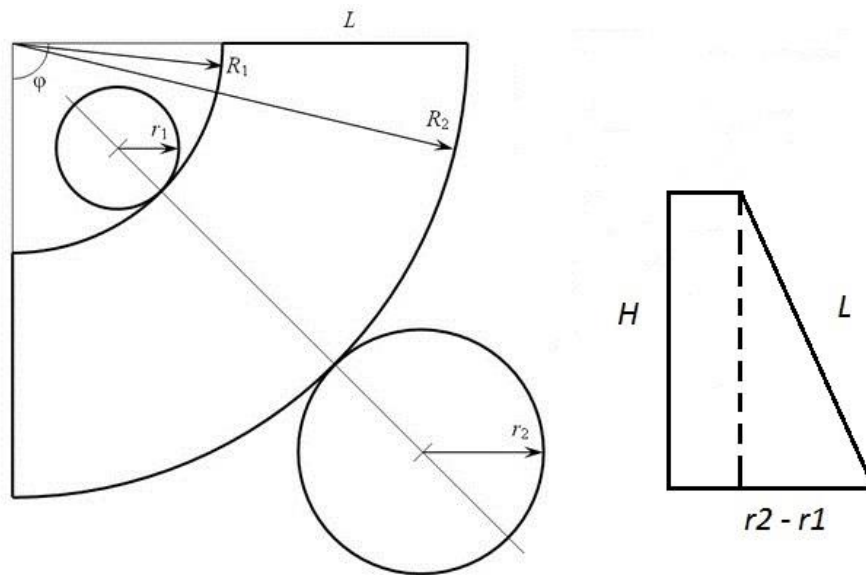


Figure 3.6: Paramètres pour réalisation du convergent

Les données sont (en mm) :

- Rayon r_1 de la base = 300
- Rayon r_2 seconde base = 100
- Hauteur du cône = 500
- Hauteur de la génératrice $L = 539$
- Rayon de l'arc inférieur $R_2 = 808$
- Rayon de l'arc supérieur $R_1 = 269$
- Angle central $\varphi = 134^\circ$
- Longueur de l'arc inférieur = 1885
- Longueur de l'arc supérieur = 628
- Longueur de la corde de l'arc inférieur = 1485

— Les poulies

Les poulies sont obtenues brutes par fonderie et usinées pour obtenir les formes et les dimensions finales voulues. Le matériau utilisé est l'aluminium. La machine-outil consacrée pour l'usinage des poulies est un tour parallèle. Les tours parallèles sont utilisées pour la réalisation des pièces de révolution. Les opérations d'usinage réalisées pour obtenir la forme et les dimensions finales des poulies sont : le chariotage, le dressage, l'alésage et à la fin la réalisation des gorges pour le logement des courroies.

— La structure

Le bâti qui supporte tous les composants du dispositif est en cornière de $35 \times 35 \times 3$. La réalisation de ce bâti s'obtient par des opérations simples de sciage et de soudage. Pour ça, il faut disposer d'une règle graduée pour la mesure, une équerre pour garantir la perpendicularité des cornières découpées, une scie manuelle et enfin d'un poste à souder.

— Le disque

Le disque est également obtenu brut par fonderie et usiné pour être conforme aux dimensions souhaitées. Le disque est en aluminium. Il est réalisé sur un tour parallèle par des opérations de chariotage, de dressage et d'alésage. Des trous taraudés sont disposés sur la circonférence du disque pour recevoir les bras munis des pales.

— Les pales et les bras

Les pales sont découpées dans une tôle d'épaisseur $e = 4 \text{ mm}$ suivant la dimension voulue. La découpe est faite après avoir dessiné un gabarit de forme sur la tôle. On utilise une scie électrique pour la découpe, l'opérateur se contentant de suivre la forme du gabarit.

Pour ce qui est des bras, il suffit d'acheter dans le commerce, la barre de fer au même diamètre que ces derniers. On découpe les longueurs adéquates et on réalise aux extrémités sur un tour parallèle les opérations de filetage. Les filets serviront pour leurs assemblages avec les pales munies d'écrous soudés à l'arrière et avec le disque.

6. Analyse économique du dispositif

Cette section aborde l'aspect économique du dispositif. Trois points sont principalement discutés. Il s'agit : du devis quantitatif et estimatif de la réalisation, de sa durée de vie et de sa maintenance.

6.1. Devis estimatif du prototype

Le devis quantitatif et estimatif proposé dans ce document est lié à la puissance de sortie voulue. La puissance souhaitée du prototype dimensionné est de 10 kW . Le devis devra être adapté aux puissances désirées pour la reproduction du dispositif.

Les différentes rubriques de ce devis sont au nombre de quatre. C'est l'achat : de la matière d'œuvre, des composants standards à utiliser directement sur le dispositif, du prix de confection sur machines-outils et enfin des frais de montage et de main-d'œuvre.

Le tableau suivant résume ces différentes rubriques.

Tableau 3. 2: Devis quantitatif et estimatif pour la réalisation du prototype

N°	Désignation	Quantité	Prix unitaire (CFA)	Prix total (CFA)
Matière d'œuvre				
01	Cornière 35 × 35 × 3	10	20 000	200 000
02	Tôle galvanisée 2400 × 1220 × 2	2	70000	140 000
03	Fer rond plein $\phi 20 \times 6m$	2	17 000	34 000
04	Fer rond plein $\phi 30 \times 0,75m$	1	25 000	25 000
05	Tôle de $e = 4$	1	80 000	80 000
06	Poulie de $\phi 500 \times 50$ brute	1	50 000	50 000
07	Poulie de $\phi 100 \times 50$ brute	1	30 000	30 000
Sous-total 1				559 000
Prix des accessoires et pièces standards				
01	Courroie Trap type B	2	15 000	30 000
02	Alternateur de 10 kW	1	200 000	200 000
03	Écrous $M20$	6	700	4 200
04	Écrous $M14$	20	600	12 000
05	Roulements BC	4	50 000	200 000
Sous-total 2				446 200
Dépenses de fabrication				
01	Usinage Poulie de $\phi 500 \times 50$			30 000
02	Usinage Poulie de $\phi 100 \times 50$			30 000
03	Usinage des bras			20 000
04	Découpe cornières			15 000
05	Opérations de soudage			60 000
Sous-total 3				155 000
Dépenses liées au montage du dispositif et main-d'œuvre				
Sous-total 4				250 000
Autres dépenses				200 000
Total				1 610 200

Toutefois, il faudra ajuster ces prix aux prix du marché sans cesse changeant.

6.2. Maintenabilité

Un aspect important d'un projet de conception et réalisation est la capacité à le maintenir en bon état de fonctionnement. Sans ce contrôle, le produit fabriqué n'assurera pas efficacement la fonction souhaitée sur toute sa durée d'utilisation. En outre, il s'agit de garantir la durée de vie du matériel. Il faudra tout au moins assurer

une production continue du dispositif jusqu'à son amortissement. Autrement, l'entreprise ne serait pas viable, ni rentable, ni même envisageable.

La norme AFNOR (Association Française de Normalisation) NF-X 60 000, définit la maintenance comme l'ensemble des actions ayant pour objectif de maintenir ou rétablir un bien ou un produit dans un état spécifié de fonctionnement pour établir une fonction requise.

Le dispositif éolien réalisé doit être le plus facilement maintenable possible. De ce point de vue, les éléments mécaniques utilisés doivent être interchangeables, de maintenance facile, démontable, facile d'accès sur le dispositif et de qualité pour éviter l'usure précoce.

En analysant les éléments cités dans le tableau 3.2, on remarque que pratiquement tous les composants utilisés sont en acier et en aluminium. Les composants en aluminium sont le disque et les poulies qui, en régime d'exploitation normale, ne présentent pas de risque d'usure majeure. Les composants en acier, ayant une résistance élevée, représentent la majorité des éléments de la machine. Les principaux éléments qui vont nécessiter un suivi et un contrôle régulier sont les roulements (graissage) et la courroie (protection contre les intempéries ou tout autre élément extérieur qui pourrait l'endommager). Pour éviter la rouille due aux attaques chimiques, aux pluies acides, aux émissions atmosphériques et environnementales, il pourrait être envisagé de protéger tout le dispositif par une bâche isolante. Les seules ouvertures en contact avec l'atmosphère seront les entrées et sorties des convergents. Dans ces conditions, un nettoyage bimensuel du fond de ces composants s'avère nécessaire, surtout dans un environnement de fonctionnement très sévère, pour les débarrasser de la poussière et autres contaminants.

En définitive, une maintenance préventive systématique sera un atout incontestable pour maintenir les composants du système éolien dans leur état de fonctionnement optimal.

6.3. Durée de vie

Les matériaux et les éléments mécaniques de machines, exposés au vent et aux intempéries, sont soumis à de fortes contraintes physiques. Les pièces finissent par s'user et devenir fragiles, ce qui réduit leur sécurité et leur performance.

L'évaluation de la durée de vie du dispositif éolien fabriqué dépend essentiellement de la qualité et de la robustesse de ses composants. Pour ce qui est de notre cas d'étude, l'élément ayant la plus grande durée de vie est l'alternateur avec une durée d'utilisation estimée à plus de 25 ans. Les éléments tournants tels que les roulements (2,3 ans) et la courroie (2,4 ans) ont une durée de vie théorique relativement moyenne.

Ceci n'est en aucun cas un problème, puisque ces deux derniers composants cités sont d'une maintenance très facile. Le reste des composants mécaniques du dispositif étant tous en métaux ferreux, leur durée d'exploitation reste très élevée avec un entretien approprié.

Il est admis, à la lecture des informations du paragraphe précédent et avec un entretien et une maintenance préventive bien menée, que le dispositif réalisé, aura une durée de vie d'au moins 25 ans. Il suffit de changer les éléments de machines à durée de vie moyenne/faible chaque fois que besoin sera, en définitive comme sur toute machine industrielle.

6.4. Comparaison avec quelques éoliennes classiques

En se référant au prix du marché, une comparaison (tableau 3.3) est présentée avec quelques éoliennes classiques de puissance 10 kW [84].

Tableau 3. 3: Prix de quelques modèles industriels d'éoliennes

Modèle	Prix en F CFA
Windtronics BTPS 6500 (Windtronics)	3 208 685
Aérocube (Aeolta)	3 287 585
Éolienne Philippe Starck (Windeo)	4 931 380
Windspire (Windspire energy)	4 939 270
Whisper 500 (Southwest Windpower)	7 166 940
Skystream 600 (Southwest Windpower)	8 218 965
Horizon 1,8 (Eole System)	9 892 760
Nheowind 3D 100 (Nheolis)	11 835 310
Turbolienne Elena (Elena Énergie)	12 492 830

Force est de remarquer que dans ce tableau, les éoliennes les moins chères coûtent environ 3,3 millions de francs CFA sur le marché. En comparaison avec le modèle réalisé, qui coûte au maximum 1,7 millions de francs CFA, on voit bien une grande différence de prix. Un autre avantage de notre dispositif est qu'il peut être utilisé comme un dispositif multiplicateur de puissance en cas d'indisponibilité du vent. C'est un atout qui le rend plus compétitif par rapport aux éoliennes classiques.

7. Analyse des impacts du projet sur l'environnement.

De façon globale, l'énergie éolienne a longtemps été perçue comme une véritable pépite d'or, car tout en offrant de l'énergie, elle est également respectueuse de l'environnement. Le prototype réalisé se comporte exactement comme une éolienne classique dans ce domaine, avec quelques avantages en plus. Son comportement dans les trois milieux à savoir le milieu physique, naturel et humain est abordé ci-dessous.

7.1. Milieu physique

Les principaux effets (directs et indirects ; permanents ou temporaires) sur le milieu physique à attendre, de l'implantation du prototype réalisé sont liés aux équipements et infrastructures nécessaires à sa construction et son installation. Le dispositif lui-même ne produit aucun polluant en phase d'exploitation.

7.1.1. Émissions carbonées et qualité de l'air

Un des intérêts majeurs du dispositif réalisé est l'absence de production de polluants atmosphériques, et notamment de gaz à effet de serre, lors de la phase d'exploitation. Néanmoins, on sait que pendant la phase de réalisation, de la manutention et de l'implantation, une production temporaire de polluants atmosphériques est induite. Cet impact environnemental, temporaire, inhérent à toute nouvelle construction, peut être jugé de faible ampleur.

7.1.2. Émissions des polluants dans l'atmosphère

D'un point de vue global, l'énergie éolienne est largement reconnue comme une des technologies énergétiques la moins dommageable pour l'environnement. Elle est même qualifiée d'énergie verte. À ce titre, le prototype réalisé n'émet pas de gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4), pas d'oxydes d'azote (NO_x), ni d'oxydes de soufre (SO_x) dans l'atmosphère. Quantitativement, l'intrant principal et nécessaire (vent) à la production d'énergie électrique est gratuit et renouvelable dans le cas du dispositif exposé dans l'environnement. Dans ce cas, il n'y a aucun impact écologique ou économique dû à une surexploitation de cette ressource.

À titre de comparaison, le tableau suivant exprime les volumes de gaz rejetés en phase exploitation par les sources d'énergie fossiles en comparaison au dispositif réalisé.

Tableau 3. 4: Rejet de polluants dans l'atmosphère selon différentes sources d'énergie en phase d'exploitation [85]

Pollution en <i>kg/an</i> pour une production annuelle de 50 600 000 <i>kWh</i>	Source conventionnelle d'énergie			Prototype réalisé
	Charbon	Pétrole	Gaz	
Gaz carbonique (CO_2)	45793000	35926000	20240000	0
Monoxyde de carbone (CO)	4301	7084	1518	0
Oxydes de soufre (SO_x)	683100	361790	0	0
Oxydes d'azote (NO_x)	126500	113850	25427	0
Méthane (CH_4)	506	1012	6325	0
Acide chlorhydrique HCl	4807	0	0	0
Cendres	5894900	5060	0	0
Composés organiques volatils	1518	1518	0	0
Particules	1771	20240	0	0

En substitution des centrales conventionnelles d'énergie (charbon, pétrole, gaz), le système éolien fabriqué demeure une alternative propre en termes d'émissions de polluants en phase exploitation.

Il serait aussi important de signaler que le prototype réalisé n'a pas d'impact sur le sol ou le sous-sol, car ne provoquant aucune modification de ces derniers ni sur les eaux superficielles ou souterraines.

7.2. Milieu humain et naturel

En mode de fonctionnement en environnement ambiant, le dispositif exploite de l'air, et du fait du choix de matériaux et des composants silencieux (voir chapitre 4), la nuisance sonore produite est faible. Ce qui lui confère une commodité de voisinage très acceptable. Du point de vue exploitation, le dispositif est conçu et réalisé de telle sorte qu'il n'occasionne pas de problème de sécurité à son utilisateur. La position des convergents et des pales à des emplacements bien pensés rend le dispositif très robuste, de sorte qu'il ne présente pas de danger pour son exploitation.

En dehors de quelques risques de nidification des oiseaux ou d'utilisation du fond des convergents comme séjour temporaire pendant les saisons d'absence de vent qui pourrait leur être préjudiciable en cas de reprise de ce dernier, il n'y a pratiquement pas d'impact négatif sur la faune.

Un document mis en annexe (Annexe 6) recense les différentes sources d'énergie et propose une comparaison en termes d'avantages et d'inconvénients des autres formes d'énergies et même de l'énergie éolienne. En comparant notre dispositif aux éoliennes classiques, nous pensons que par ricochet, notre dispositif est comparé à ces autres formes d'énergie.

8. Conclusion

Ce chapitre a abordé, le dimensionnement des composants tournants du dispositif. L'axe du disque, les roulements et le système de transmission sont ainsi calculés et choisis. Le choix est orienté vers les solutions les moins coûteuses et disponibles sur le marché pour faciliter la reproduction du prototype. Les dessins de définition de chacun des composants du dispositif sont mis en annexe. Les opérations pour la mise en forme et la réalisation des éléments du dispositif sont aussi expliquées.

Le second aspect de ce chapitre a porté sur l'étude économique du dispositif éolien. Il est remarquable de voir que la matière d'œuvre nécessaire pour produire le prototype est très abordable à la vue du bénéfice énergétique qu'on en tire. La comparaison avec les éoliennes classiques de commerce, de même puissance, montre une différence significative en termes de prix d'achat. A la lecture de ce qui est présenté dans ce chapitre, il n'y a aucun doute en ce qui concerne la rentabilité de ce projet.

L'étude d'impact environnemental détaillée dans la dernière partie a montré que le dispositif n'émet aucun polluant dans la nature, n'agit ni sur le sol, encore moins sur les eaux de surface ou souterraines. Le choix des composants, axé sur la réduction du bruit, fait du dispositif un produit plutôt sain en ce qui concerne la nuisance sonore.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Les problèmes à l'origine des difficultés de fonctionnement des éoliennes classiques qui ont inspiré cette recherche se résument aux dimensions démesurées de celles-ci. En effet, pour avoir une vitesse de vent capable d'amorcer leur fonctionnement, il est parfois nécessaire d'élever les mâts à plus de 80 mètres et les pales à des longueurs dépassant parfois 50 mètres. Dans ces conditions, les problèmes de vibration, de stabilité du bâti ainsi que ceux liés à la sécurité rendent l'exploitation dangereuse. À cela il faudrait ajouter le freinage urgent du système éolien lorsque la vitesse de vent dépasse un certain seuil, ce qui en ajoute à l'insécurité et au coût élevé exprimé dans le tableau 4.2. Dès lors, les missions assignées à cette recherche sont : comment produire de l'énergie électrique à des puissances comparables à celles des éoliennes classiques à partir des vitesses de vent insuffisantes pour leur amorçage. Une telle solution trouvée règle en grande partie les difficultés liées à leur exploitation. C'est ce que ce projet de recherche s'est attelé à faire et dont les conclusions et perspectives sont présentées dans les lignes qui suivent.

1. Synthèse des travaux

La première partie de nos travaux a consisté à évaluer le potentiel énergétique dans la région de N'Guigmi (Chapitre 1 – section 7). Avec les données statistiques en notre possession, il a été possible d'étudier les vitesses de vent pour faire ressortir les moyennes et les maximas. Les stations synoptiques pour fournir les données météorologiques sont rares sur le continent africain, et quand elles sont disponibles, elles sont vétustes et ne fournissent que des données très peu fiables. Nous avons alors développé une méthodologie pour estimer les vitesses moyennes dans une région à partir de quelques données atmosphériques qui elles sont disponibles même à l'international. Ainsi, nous avons montré qu'en suivant l'évolution des températures et de l'humidité relative, il est possible d'estimer la tendance de l'évolution du vent dans une région et par des périodes (Chapitre 1 – section 7.3 – [86]) . Ainsi ce travail nous a permis de comprendre les plages moyennes autour desquelles il faut calibrer l'accélérateur de flux à adopter pour produire une puissance énergétique souhaitée.

Une fois les paramètres météorologiques connus, les équations nécessaires pour déterminer les plages de fonctionnement de notre accélérateur de flux sont adoptées. Il en est également du calcul de tous les autres composants du dispositif (masse du disque, diamètre des pales, les bras, le nombre de pales et leur disposition, diamètre des poulies pour un coefficient de transmission choisi). C'est finalement un convergent qui est retenu.

Les méthodes adéquates de choix d'un ventilateur pour une utilisation sur le dispositif sont aussi détaillées. Le choix du disque utilisé, dont la masse est minutieusement calculée, est expliquée. Il faut souligner aussi le calcul de nombre de pales et surtout leur disposition sur le disque pour une exploitation optimale du dispositif.

2. Application au nouveau dispositif éolien

Plusieurs utilisations du convergent sont proposées suivant le cas de figure où le dispositif est un multiplicateur de puissance ou un dispositif de production d'énergie électrique en environnement ambiant.

En dispositif multiplicateur de puissance, les convergents sont disposés de façon à créer sur deux pales, et ce continuellement, une pression dynamique récupérée du flux de vent issue des ventilateurs. Les deux ventilateurs sont placés en opposition sur les pales inférieure et supérieure. La mise en œuvre de cette disposition confère au dispositif une croissance certaine de ses performances en sortie.

En dispositif de production d'énergie électrique, le système éolien réalisé est muni de trois convergents disposés de telle sorte que trois pales soient toujours dans le champ du flux de vent. Les paramètres de sortie du dispositif sont ainsi améliorés. La puissance développée par le dispositif muni des trois convergents est évaluée à $\mathcal{P}_{glob} = (3 - 2K)\mathcal{P}_{théo}$ (Chapitre 2 – section 5.3), ce qui confirme l'accroissement de la puissance de sortie.

Le gaz de service utilisé dans ce travail est de l'air, parce que gratuit. Cependant, au cas où il existerait un gisement d'un autre gaz, il pourrait avantageusement être remplacé par ce dernier. En effet les simulations réalisées avec différents gaz (voir Chapitre 2 – section 5.2.5) montrent que la puissance est plus élevée lorsque le coefficient polytropique est faible.

Toutefois, toute proportion gardée, il faut dire que les résultats économiques sont équivalents à l'utilisation de l'air. Autrement dit, en prenant en compte le coût de production du dit gaz, comparé à la puissance dégagée, une compensation systématique s'établit au point où il n'y aurait certainement pas trop de bénéfice à engranger par rapport à l'utilisation de l'air, qui lui est totalement gratuit. L'option d'utiliser un autre gaz que l'air est donc prise en tenant compte d'un certain nombre de facteurs dont : l'indisponibilité d'une vitesse moyenne acceptable, l'existence du gisement d'un gaz, une étude comparable de puissances désirées au regard des gains économiques.

3. Calcul du dispositif et sa réalisation

Tous les calculs des éléments tournants ont été réalisés (voir chapitre 3). Les dessins de définition et d'ensemble sont mis en annexe pour une reproductibilité du dispositif. Les phases de découpe, de réalisation et d'usinage ont été abordé (Chapitre 3 – section 5). Les photos de ces opérations ainsi que le dispositif grandeur nature sont disponible en annexe également.

4. Les limites du modèle

Nous devons remarquer que, pour produire des puissances de l'ordre du mégawatt à partir d'une vitesse de vent relativement faible, il va falloir développer un convergent avec des dimensions assez conséquentes (voir Figure 2.14). C'est-à-dire qu'on serait amené à avoir des ouvertures circulaires d'entrée et de sortie du convergent de taille relativement importante. Ainsi, l'encombrement est ici aussi présent dans le dispositif proposé. Mais cette fois-ci, il ne serait pas vertical, mais radial. Ce qui témoigne d'une certaine limite du dispositif. Néanmoins, les risques de vibrations, d'instabilité et d'insécurité sont réduits par rapport aux éoliennes classiques.

5. Perspectives

Les perspectives d'exploitation de cette technologie sont diverses et variées. On peut notamment l'utiliser dans les cas qui suivent :

- Dans une station de pompage où le dispositif placé au sommet d'un château pour bénéficier de la vitesse du vent peut réaliser un pompage d'eau à l'aide d'une vis sans fin.
- Placé le convergent au-devant d'une automobile et les pales, couplés à un moteur électrique pourrait produire l'énergie électrique nécessaire à son déplacement. Le surplus d'énergie pourrait être stocké dans une batterie pour rendre possible le démarrage du véhicule.
- Le dispositif pourrait être installé dans un tunnel pour bénéficier de l'air confiné mais en déplacement à grande vitesse engendrer par le déplacement des véhicules (voitures, trains, TGV , etc.)

Les perspectives pour finaliser cette étude et amener le prototype à sa maturité se rapporteront avant tout à la validation des résultats expérimentaux pour évaluer l'efficacité du dispositif réalisé.

RÉFÉRENCES

- 1- NANO Enrico, *"Electrifying Nigeria: The impact of rural access to electricity on kids' schooling"*, Graduate Institute of International and Development Studies Working Paper, No. 03-2022, Graduate Institute of International and Development Studies, Geneva, 2022.
<http://hdl.handle.net/10419/253255> . Consulté le 28 Août 2022
- 2- Bureau, D., Bureau, J. & Schubert, K. *"Biodiversité en danger : quelle réponse économique ?"* Notes du conseil d'analyse économique, 59, 1-12, 2020.
<https://doi.org/10.3917/ncae.059.0001>. Consulté le 2 Septembre 2022
- 3- JETTEUR Claire, *"Étude comparative des différents modes d'alimentation en électricité en Afrique rurale"*. Master en sciences et gestion de l'environnement, Soutenu le 21-jui-2018. Université de Liège, Liège, Belgique. 51.
<http://hdl.handle.net/2268.2/4989>. Consulté le 14 Mai 2022
- 4- MIGUEL Lopez *" Contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée"*. Énergie électrique. Thèse de Doctorat - 2008. Université Paris Sud - Paris XI, Français. 151 [tel-00344978](tel:00344978)
- 5- Bernard Multon, Olivier Gergaud, Hamid Ben Ahmed, Xavier Roboam, Stéphane Astier, et al. *" État de l'art des aérogénérateurs. L'électronique de puissance vecteur d'optimisation pour les énergies renouvelables"*, Ed. NOVELECT - ECRIN, ISBN 2-912154-8-1, pp.97-154, 2002.
- 6- IRENA, *"Rethinking Energy 2017: Accelerating the global energy transformation"*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi (2017).
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiOo93sn8T7AhWpQaQEHevYATgQFnoECBoQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.irena.org%2F%2Fmedia%2FFiles%2FIRENA%2FAgency%2FPublication%2F2017%2FIRENA_REthinking_Energy_2017.pdf&usg=AOvVaw3g-NyRsRSu9-1Zh7zdoDP1 Consulté le 11 Mars 2021
- 7- FRÉDÉRIC Poitiers *" Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau"*, Thèse de Doctorat, 2003, Université de Nantes, 137. [tel-00011383](tel:00011383)
- 8- BOUHEDDA. Ali *" Contribution à l'étude de système de commande d'une éolienne"*, Mémoire de Magister, 2011, Université de Tizi-Ouzou, 97.
- 9- CHERFIA. Naïm *" Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens"*, Mémoire de Magister, 2010, Université de Mentouri Constantine, 96.
- 10-TARAFT Saci *" Étude de stockage inertiel d'énergie dans une chaîne de conversion éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation"*, Mémoire de Magister, 2008, Université Bejaia, 79.
- 11-BESLIN GUY, MULTON Bernard. *" Production d'électricité éolienne : de la caractérisation du gisement éolien aux technologies d'aérogénérateurs"*. 2016. <hal-01756827>

- 12-**HAMECHA Samira, " *Étude et Commande d'une Éolienne à base d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents*". Mémoire de Magister ; soutenu le 25/06/2013, université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 87.
- 13-**LOUAR Fateh. "Modélisation Et Simulation D'une Chaîne De Conversion D'énergie Éolienne À Base D'une Machine Synchrone À Aimant Permanent". Thèse de Doctorat, 2016, Université Badji Mokhtar - Annaba, 93.
- 14-**ARTHOUROS ZERVOS, SVEN TESKE " *Perspectives mondiales de l'énergie éolienne 2006*" septembre 2006.
http://www.abhatoo.net.ma/content/download/10624/171347/version/1/file/Perspectives_mondiales_energie_eolienne.pdf
 Consulté le 21 Décembre 2021
- 15-**HARITZA CAMBLONG "Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable" thèse de doctorat, 2003, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers – Centre de Bordeaux ; 212.
- 16-**TOUAL BELKACEM "Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Éolien à Vitesse Variable" mémoire de magister, 2010, Université de Batna, 107.
- 17-**W. Tong, *Wind power generation and wind turbine design*: WIT press, 2010.
- 18-**M. Abdel-Aziz, F. Abdel-Aziz. "Hybrid Nanocrystal Photovoltaic/Wind Turbine Power Generation System in Buildings". *Journal of Advanced Research in Materials Science* 40 (2018): 8-19.
- 19-**S. Eriksson, H. Bernhoff, and M. Leijon, "Evaluation of different turbine concepts for wind power," *renewable and sustainable energy reviews*, vol. 12, pp. 1419-1434, 2008.
- 20-**M. Johari, M. Jalil, and M. Shariff, "Comparison of horizontal axis wind turbine (HAWT) and vertical axis wind turbine (VAWT)," *International Journal of Engineering and Technology*, vol. 7, pp. 74-80, 2018.
- 21-**M. Saad and N. Asmuin, "Comparison of horizontal axis wind turbines and vertical axis wind turbines," *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*, vol. 4, pp. 27-30, 2014.
- 22-**K. Pope, I. Dincer, and G. Naterer, "Energy and exergy efficiency comparison of horizontal and vertical axis wind turbines," *Renewable energy*, vol. 35, pp. 2102-2113, 2010.
- 23-**M. Bhutta, N. Hayat, A. Farooq, Z. Ali, S. Jamil, and Z. Hussain, "Vertical axis wind turbine—A review of various configurations and design techniques," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 1926-1939, 2012.
- 24-**R. Kumar, K. Raahemifar, and A. Fung, "A critical review of vertical axis wind turbines for urban applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 89, pp. 281-291, 2018.
- 25-**Dragomirescu A. "Performance assessment of a small wind turbine with crossflow runner by numerical simulations", *Renewable Energy* 36, 2011, pp. 957 – 965.

- 26-**W. T. Chong, Y. Shiah, K. H. Wong, N. L. Sukiman, S. C. Poh, C. T. Wang, "Performance enhancements on vertical axis wind turbines using flow augmentation systems: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 73, 2017, pp. 904–921.
- 27-**M. Guero, V. PRODJINONTO, "Design and Analysis of An Innovative Wind Flow Accelerator for Wind Devices". *International Journal of Progressive Sciences and Technologies*, 32(2), 350-358, 2022.
- 28-**T. Shigemitsu, J. Fukutomi, M. Toyohara, "Performance and flow condition of cross-flow wind turbine with a symmetrical casing having side boards", *International Journal of Fluid Machinery and System* 9, 2016, pp. 169-174.
- 29-**M. Takao, T. Maeda and Y. Kamada, "A Straight-blades Vertical Axis Wind Turbine with a Directed Guide Vane Row", *Journal of Fluid Science and Technology* 3, 2008, pp. 379-386.
- 30-**W. T. Chong, S. C. Poh, A. Fazlizan, K. C. Pan, "Vertical axis wind turbine with omni directional guide vane for urban high-rise building", *Journal of Central South University*, 19, 2012, pp. 727-732.
- 31-**N. Korprasertsak and T. Leephakpreeda, "Analysis and optimal design of wind boosters for Vertical Axis wind Turbines at low wind speed", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 159, 2016, pp. 9–18.
- 32-**R. Gupta and A. Biswas, "CFD analysis of flow physics and aerodynamic performance of a combined three-bucket Savonius and three-bladed Darrieus turbine," *International journal of green energy*, vol. 8, pp. 209-233, 2011.
- 33-**M. Castelli and E. Benini, "Comparison between lift and drag-driven VAWT concepts on low-wind site AEO," *World Academy of Science, Engineering and Technology*, pp. 1677-1682, 2011.
- 34-**J. Gavalda, J. Massons, and F. Diaz, "Experimental study on a self-adapting Darrieus-Savonius wind machine," *Solar & Wind Technology*, vol. 7, pp. 457-461, 1990.

- 35-**A. Pallotta, D. Pietrogiacomini, and G. Romano, "HYBRI—A combined Savonius-Darrieus wind turbine: Performances and flow fields," *Energy*, vol. 191, p. 1-23, 2020.
- 36-**T. Wakui, Y. Tanzawa, T. Hashizume, and T. Nagao, "Hybrid configuration of Darrieus and Savonius rotors for stand-alone wind turbine-generator systems," *Electrical Engineering Conference in Japan*, vol. 150, pp. 13-22, 2005.
- 37-**S. Chawla, A. Chauhan, and S. Bala, "Parametric study of hybrid Savonius-Darrieus turbine," in *2015 2nd International Conference on Recent Advances in Engineering & Computational Sciences (RAECS)*, pp. 1-5, 2015.
- 38-**W. Wang, J. Wang, and W. Chong, "The effects of unsteady wind on the performances of a newly developed cross-axis wind turbine: A wind tunnel study," *Renewable Energy*, vol. 131, pp. 644-659, 2019.
- 39-**R. Howell, N. Qin, J. Edwards, and N. Durrani, "Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine," *Renewable energy*, vol. 35, pp. 412-422, 2010.
- 40-**A. Molina, T. Troyer, T. Massai, A. Vergaerde, M. Runacres, and G. Bartoli, "Effect of turbulence on the performance of VAWTs: An experimental study in two different wind tunnels," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 193, p. 1-12, 2019.
- 41-**K. Lee, S. Tsao, C. Tzeng, and H. Lin, "Influence of the vertical wind and wind direction on the power output of a small vertical-axis wind turbine installed on the rooftop of a building," *Applied Energy*, vol. 209, pp. 383-391, 2018.
- 42-**L. Gumilar, A. Kusumawardana, M. Habibi, A. Afandi, D. Prihanto, and A. Aji, "Performance analysis of vertical wind turbine type savonius-I based on wind speed, rotation speed, and number of blades," in *2019 International Seminar on Application for Technology of Information and Communication (iSemantic)*, pp. 383-388, 2019.
- 43-**A. Rezaeiha, I. Kalkman, and B. Blocken, "Effect of pitch angle on power performance and aerodynamics of a vertical axis wind turbine," *Applied energy*, vol. 197, pp. 132-150, 2017.
- 44-**B. Mantravadi, K. Sriram, A. Mohammad, L. Vaitla, and R. Velamati, "Effect of solidity and airfoil on the performance of vertical axis wind turbine under fluctuating wind conditions," *International Journal of Green Energy*, vol. 16, pp. 1329-1342, 2019.
- 45-**X. Sun, J. Zhu, A. Hanif, Z. Li, and G. Sun, "Effects of blade shape and its corresponding moment of inertia on self-starting and power extraction performance of the novel bowl-shaped floating straight-bladed vertical axis

- wind turbine," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 38, p. 1-18, 2020.
- 46-**M. Zamani, S. Nazari, S. Moshizi, and M. Maghrebi, "Three-dimensional simulation of J-shaped Darrieus vertical axis wind turbine," *Energy*, vol. 116, pp. 1243-1255, 2016.
- 47-**M. Hameed, S. Afaq, and F. Shahid, "Finite element analysis of a composite VAWT blade," *Ocean Engineering*, vol. 109, pp. 669-676, 2015.
- 48-**L. Wang, A. Kolios, T. Nishino, P. Delafin, and T. Bird, "Structural optimisation of vertical-axis wind turbine composite blades based on finite element analysis and genetic algorithm," *Composite Structures*, vol. 153, pp. 123-138, 2016.
- 49-**M. Zheng, Y. Li, H. Teng, J. Hu, Z. Tian, and Y. Zhao, "Effect of blade number on performance of drag type vertical axis wind turbine," *Applied solar energy*, vol. 52, pp. 315-320, 2016.
- 50-**S. Mitchell, I. Ogbonna, K. Volkov, "Improvement of Self-Starting Capabilities of Vertical Axis Wind Turbines with New Design of Turbine Blades". *Sustainability*, 13, 3854, 2021.
- 51-**W. Chong, W. Muzammil, K. Wong, C. Wang, M. Gwani, Y. Chu, *et al.*, "Cross axis wind turbine: Pushing the limit of wind turbine technology with complementary design," *Applied Energy*, vol. 207, pp. 78-95, 2017.
- 52-**N. Alom and U. Saha, "Four decades of research into the augmentation techniques of Savonius wind turbine rotor," *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 140, 2018.
- 53-**Ma Yang, He Cheng bing, Feng Xinxin. "Institutions Function and Failure Statistic and Analysis of Wind Turbine". *Physics Procedia* 2012; 24:25 – 30.
- 54-**Attya AB, Hartkopf T. "Penetration impact of wind farms equipped with frequency variations ride through algorithm on power system frequency response". *Electrical Power and Energy Systems* 2012; 40:94 – 103.
- 55-**V Yaramasu, B Wu, PC Sen, S Kouro, M Narimani.' *High-power wind energy conversion systems: State-of-the-art and emerging technologies'* Proceedings of the IEEE, 2015
- 56-**W. Y. Liu et al. "The structure healthy condition monitoring and fault diagnosis methods in wind turbines: A review ", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 44 (2015) 466 – 472.
- 57-**Saidou MADOUGOU. " *Étude du potentiel éolien du jet nocturne dans la zone sahélienne à partir des observations de radars profileurs de vent*", Thèse de Doctorat, 2010, Université de Toulouse, 214.

- 58-**Nachida KASBADJI MERZOUK “ *Évaluation du gisement énergétique éolien contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie* ”, THESE de Doctorat, 2006, Université Abou-Bakr Belkaïd Tlemcen, 114.
- 59-**Hassan NFAOUI “ *Caractéristiques du Gisement Éolien Marocain et Optimisation d'un Système Aérogénérateur/groupe Électrogène pour l'Électrification des Villages Isolés* ”, THESE de Doctorat d'ETAT, 2004, Université Mohammed V, 353.
- 60-**Abul Kalam Azad, Mohammad Golam Rasul and Talal Yusaf “ *Statistical Diagnosis of the Best Weibull Methods for Wind Power Assessment for Agricultural Applications* ”, 7, 30563085 ; 2014, doi : 10.3390/en7053056.
- 61-**FELLAH Boumediene, “ *Système hybride photovoltaïque-éolien, de production d'électricité. Application aux sites de Tlemcen et de Bouzaréah* ”, Mémoire de Magister, 2012, Université Abou-Bakr Belkaïd Tlemcen, 151
- 62-**D.K. Kidmo, N. Djongyang, S.Y. Doka, and D. Raidandi “ *Assessment of Wind Energy Potential for Small Scale Water Pumping Systems in the North Region of Cameroon*”, International Journal of Basic and Applied Sciences, Vol3, N°1, pp. 38 - 46, 2014.
- 63-**J.L. Nsouandélé, D.K. Kidmo, S.M. Djetouda and N. Djongyang “ *Estimation statistique des données du vent à partir de la distribution de Weibull en vue d'une prédiction de la production de l'énergie électrique d'origine éolienne sur le Mont Tinguelin à Garoua dans le Nord Cameroun* ”, Revue des Énergies Renouvelables Vol. 19, N°2 (2016) 291 – 301
- 64-**D.K. Kidmo, R. Danwe , S.Y. Doka, and N. Djongyang, “*Statistical Analysis of Wind Speed Distribution Based on Six Weibull Methods for Wind Power Evaluation in Garoua, Cameroon*”, Revue des Énergies Renouvelables, Vol. 18, N°1, pp. 105 - 125, 2015.
- 65-**H. Mabchour, “ *Étude, Modélisation et Expérimentation des Composantes d'un Système Hybride Couplant les Énergies Solaire et Éolienne – Performances et Méthodologie de Dimensionnement* ”, Thèse de Doctorat, Université Hassan II Mohammedia, 1999.
- 66-**H. Faïda, J. Saadi, M. Khaider, S. El Alami et M. Monkade, “ *Étude et analyse des données du vent en vue de dimensionner un système de production d'énergie éolienne : Cas d'un site au nord du Maroc* ”, Revue des Énergies Renouvelables Vol. 13 N°3 (2010) 477 – 483
- 67-**G. Al Zohbi, P. Hendrick et P. Bouillard, “ *Évaluation du potentiel d'énergie éolienne au Liban* ”, Revue des Énergies Renouvelables, Vol. 17 N°1, 83 – 96. 2014.
- 68-**BENMEDJAHED Miloud “ *Choix du site et optimisation du dimensionnement d'une installation éolienne dans le nord Algérien et son impact sur*

- l'environnement* ", Thèse de Doctorat, 2013, Université Abou-Bakr Belkaïd Tlemcen, 158.
- 69**-Tsang-Jung Chang, Yu-Ting Wu, Hua-Yi Hsu, Chia-Ren Chu, Chun-Min Liao, " Assessment of wind characteristics and wind turbine characteristics in Taiwan ", Renewable Energy 28 (2003) 851–871
- 70**-ZERARI NAZIHA " *Modélisation et optimisation multi objectifs d'une éolienne à axe horizontal d'un système de production éolien isolé de petite taille* ", THESE de Doctorat, 2015, Université Badji Mokhtar-Annaba, 120.
- 71**-AKRABOU Omar et al. " *Étude des paramètres météorologiques intervenant dans la simulation d'un parc éolien - Cas du site d'Adrar* ", mémoire de master en physique énergétique et énergies renouvelables, université ahmed draia adrar, 2017.
- 72**-A.A. Koukpededji et al. " *Influence de la température, de la pression et de l'humidité relative de l'air sur le potentiel éolien dans la zone côtière du Bénin dans le Golfe de Guinée* " Revue des Énergies Renouvelables Vol. 18 N°2, 217 – 226 ; 2015.
- 73**-Amani M. Kouassi et al. " *Analyse de la variabilité climatique et de ses influences sur les régimes pluviométriques saisonniers en Afrique de l'Ouest : cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire* ". Revue Européenne de Géographie (Cybergéo), décembre 2010, <http://cybergéo.revue.org/index23388.html>
- 74**-Young, Donald F. ; Bruce R. Munson; Theodore H. Okiishi; Wade W. Huebsch (2010). Une brève introduction à la mécanique des fluides (5 éd.). John Wiley et fils. p. 95. ISBN 978-0-470-59679-1.
- 75**-Graebel, WP (2001). Ingénierie mécanique des fluides. Taylor et Francis. p. 16. ISBN 978-1-56032-733-2.
- 76**-J. K. Sharma, A. Goyal, M. Pandey & S. Kumar. " *Design and analysis of vertical axis wind turbine booster at low wind speed*". International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD) ; Vol. 10, Issue 3, Jun 2020, 13823-13836
- 77**-A. M. Malge, P. S. Kalos. " *Numerical Analysis of Innovative Wind Booster Configurations for Vertical Axis Wind Turbines*". International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE); Volume-9 Issue-1, May 2020. DOI :10.35940/ijrte. A1214.059120
- 78**-<https://energieplus-lesite.be/theories/ventilation10/grandeurs-caracteristiques-des-ventilateurs-d2/>
- 79**-M. Aublin, R. Boncompain, M. Boulaton, D. Caron, Système mécanique théorie et dimensionnement. Edition DUNOD, 2020.
- 80**-https://www.motralec.com/public/fichiers/docs/Texrope_Methode_de_calcul_des_courroies_synchrones.pdf

- 81**-SKF. Catalogue général SKF. 2006. ii, 69, 72, 73
- 82**-Juvinal, R. C., and Marshek, K. M. Fundamentals of Machine Component Design. 2011. 58, 60, 72, 73
- 83**-A. CHEVALIER et J. LECRINIER, Guide du dessinateur industriel, Edition HACHETTE, 2004
- 84**-Prix Eolienne pour particulier, étude des tarifs et tableau comparatif des coûts (eolienne-particulier.info)
- 85**-https://www.haute-marne.gouv.fr/content/download/12510/86612/file/5-Etude_Impact_avec_compl%C3%A9ments_n%C3%A9cessaires_au_d%C3%A9veloppement_du_parc_%C3%A9olien.pdf
- 86**-Mohamed M.G., Vincent P., and Jean-Louis F. “Correlation of meteorological parameters to characterize wind sites: A case study of N'guigmi, Niger”, *Global NEST Journal*, **24**(2), 337-343, 2022. <https://doi.org/10.30955/gnj.004155>
- 87**-M. Guero, V. PRODJINONTO, “Design and Analysis of An Innovative Wind Flow Accelerator for Wind Devices,” *International Journal of Progressive Sciences and Technologies*, 32(2), 350–358, 2022.

ANNEXE 1 : Analyse des paramètres météorologiques : ACP Région d'Agadez

Pour confirmer les résultats de la méthode d'analyse d'influence des paramètres météorologiques, une deuxième étude est faite avec les données de la zone d'Agadez.

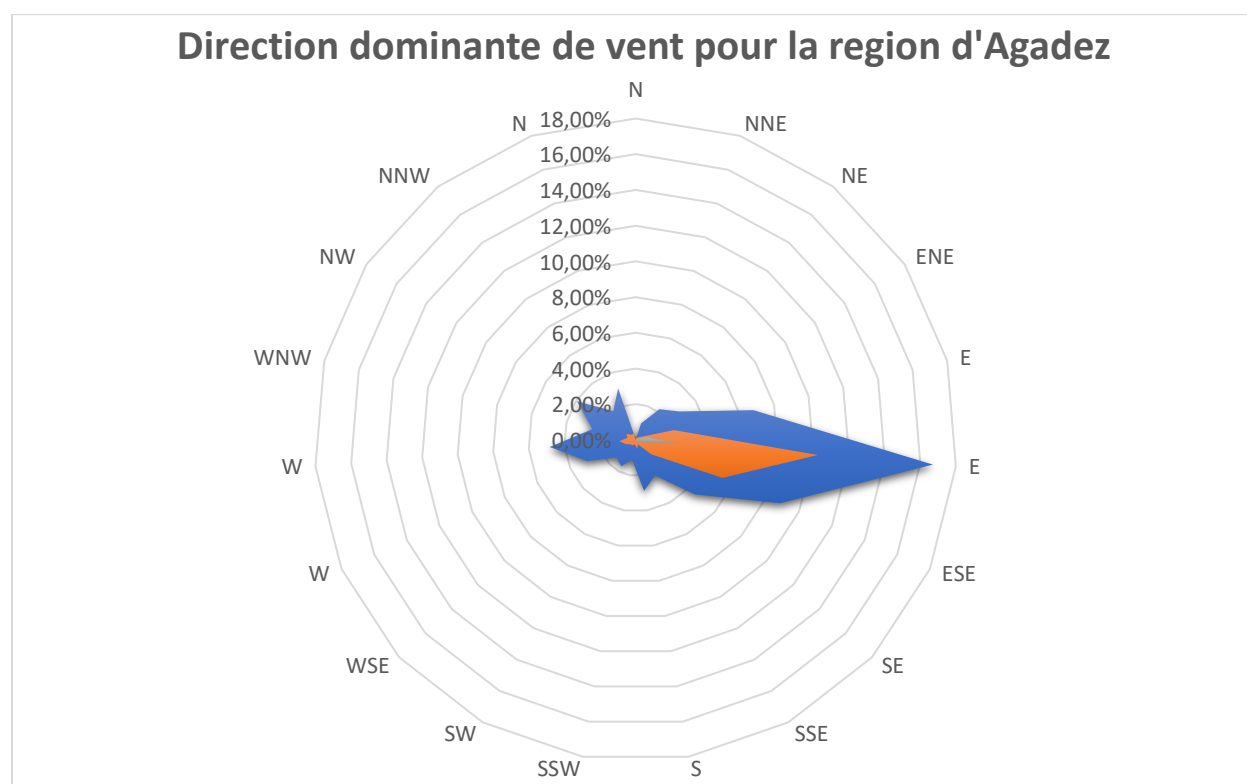


Figure 1 : Rose des vents sur la période d'observation (2010 - 2019)

Tableau 1 : statistiques descriptives des variables utilisées dans l'ACP pour la zone d'Agadez

Variable	Observ	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type	Coef de Var
Pression	120	951,235	961,871	954,790	2,084	0,21826589
Insolation	120	1,159	11,100	7,987	1,876	23,4918522
Temp Max	120	26,007	43,721	37,115	4,682	12,6149471
Temp Min	120	11,320	29,067	22,109	5,271	23,8417022
Hum Max	120	15,367	86,967	40,376	18,760	46,4628419
Hum Min	120	3,586	40,033	14,519	8,125	55,9588122

Tableau 2 : les valeurs propre des axes principaux.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Valeur propre	3,456	1,678	0,725	0,106	0,027	0,008
Variabilité (%)	57,605	27,964	12,081	1,768	0,449	0,133
% cumulé	57,605	85,569	97,650	99,419	99,867	100,000

Tableau 3 : Vecteurs propres de l'analyse

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Pression	-0,470	0,308	-0,099	0,812	-0,083	0,087
Insolation	-0,319	0,044	0,942	-0,081	0,014	-0,040
Temp Max	0,480	-0,296	0,234	0,358	0,136	0,693
Temp Min	0,512	-0,159	0,193	0,427	-0,230	-0,663
Hum Max	0,306	0,627	0,062	0,031	0,703	-0,120
Hum Min	0,302	0,630	0,080	-0,147	-0,654	0,237

Tableau 4 : Corrélations entre les variables et les facteurs

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Pression	-0,873	0,400	-0,084	0,265	-0,014	0,008
Insolation	-0,594	0,057	0,802	-0,026	0,002	-0,004
Temp Max	0,892	-0,383	0,199	0,117	0,022	0,062
Temp Min	0,952	-0,206	0,164	0,139	-0,038	-0,059
Hum Max	0,569	0,812	0,053	0,010	0,115	-0,011
Hum Min	0,561	0,816	0,068	-0,048	-0,107	0,021

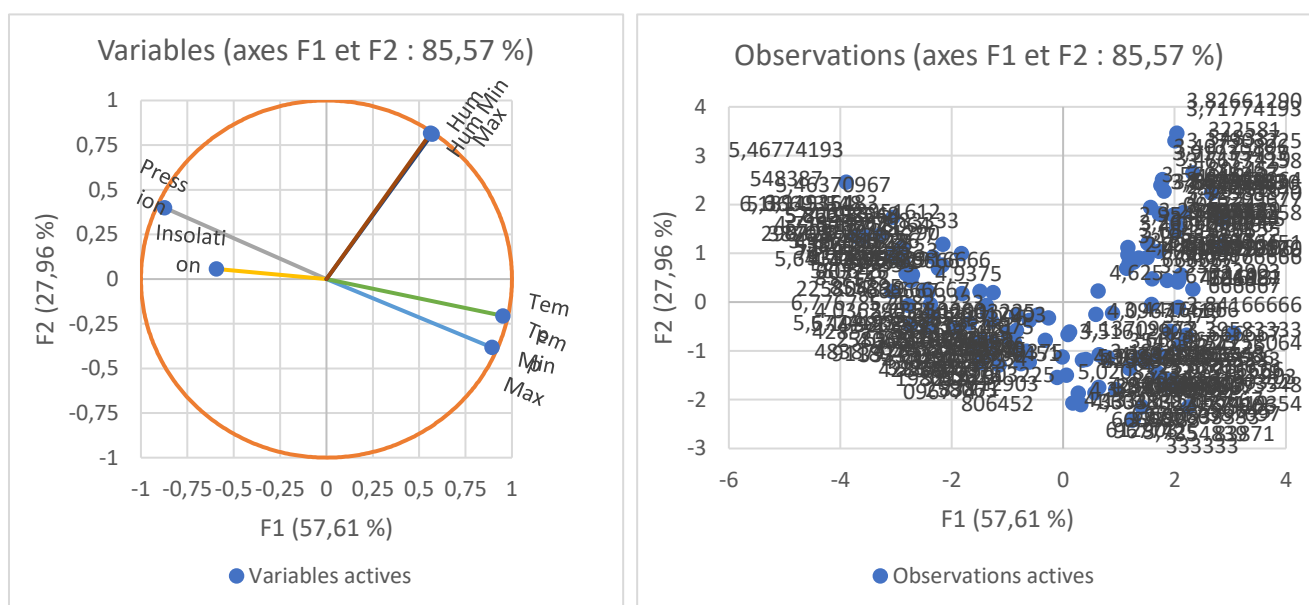


Figure 2 : Espace des variables des plans factoriels F1-F2

Le tableau 4 nous montre des valeurs de corrélation positive excessivement élevées de la température maximale et minimale avec la composante principale F1, dont la contribution est de 57,61%. La variable humidité est corrélée avec l'axe F2 et moyennement corrélée avec l'axe F1. La pression et l'insolation sont très négativement corrélées avec F1 et positivement avec l'axe F2. Les résultats obtenus révèlent que la température et l'humidité relative sont les facteurs qui influencent le plus la variation de la vitesse du vent. En effet, l'humidité relative dans ce cas de figure reste le paramètre météorologique le plus influent dans la variation de la vitesse du vent en

raison de sa très forte corrélation avec les deux facteurs F1 et F2 ; viennent ensuite la température de l'air, la pression et enfin l'insolation (tableau 4).

ANNEXE 2 : Le dispositif à convergent de flux : impact du gaz de service

Il est remarquable que la qualité du gaz de service (l'air), soit cruciale dans les résultats obtenus. Il s'agit notamment, du rôle primordial joué par le coefficient (γ), rapport des coefficients calorimétriques à pression constante et à volume constant.

Dès lors, il devient intéressant de revoir les résultats obtenus au regard des autres gaz disponibles dans la nature qui pourraient, d'une manière ou d'une autre, être substitués à l'air. Le besoin grandissant en l'énergie ne devrait s'accommoder d'aucune négligence quelque qu'elle soit.

Dans la perspective de l'existence d'un gisement de gaz ou d'une découverte d'un gisement, il serait très intéressant d'analyser comment la présente étude pourrait contribuer à la mise en œuvre dudit gaz pour produire de l'énergie électrique. La question est de savoir gagne-t-on en substituant à l'air un autre gaz ?

De toute évidence, les raisons de voir l'impact d'un autre gaz sont nombreuses et peuvent s'évaluer en termes de disponibilité, de facilité de mise en œuvre, de facilité technique et en définitive économique.

Il s'avère important, avant d'aller plus loin dans les investigations, de présenter un tableau des paramètres thermodynamiques de quelques gaz courants.

Tableau 1: Valeurs de quelques constantes thermodynamiques de quelques gaz.

Gaz	Masse (kg/kmole)	C_p (J/kg/K)	C_v (J/kg/K)	r (J/kg/K)	γ
Air	28,97	1005	718	287,1	1,4
Vapeur d'eau (H_2O)	18,02	1867	1406	61,4	1,33
Méthane (CH_4)	16,04	188,9	1687	518,7	1,32
Dioxyde de carbone (CO_2)	44,01	846	653	188,9	1,3
Éthylène (C_2H_4)	28,05	1548	1252	296,4	1,24
Acétylène (C_2H_2)	26,04	1712	1394	319,6	1,23
Éthane (C_2H_6)	30,07	1767	1495	276	1,18
Propane (C_3H_8)	44,09	1692	1507	188,3	1,12
Isobutane (C_4H_{10})	58,12	1758	1620	143,1	1,09
Octane (C_8H_{18})	114,23	1711	1638	72,8	1,04

À partir d'un programme Matlab élaboré, les valeurs des caractéristiques mécaniques d'un générateur électrique peuvent être obtenues pour un gaz donné. En remplaçant (γ) par sa valeur pour différents gaz, il a été possible de récupérer les vitesses de rotation, couple et puissance attendus sur l'axe d'un générateur électrique.

Ces différentes valeurs, recueillies et importées vers Excel ont permis de faire des tracés de courbes grâce auxquelles les comparaisons entre différents gaz ont été possibles.

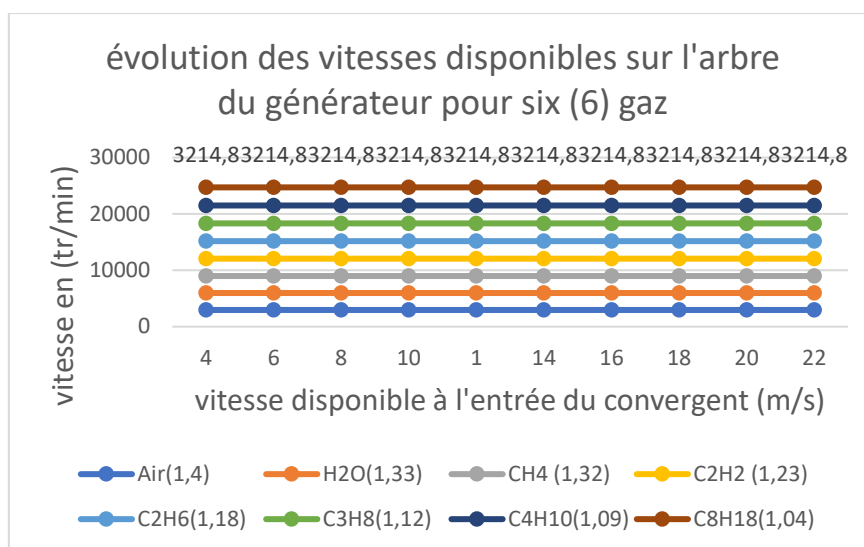


Figure 2: Classification des vitesses de rotation sur l'arbre d'un générateur pour différents gaz en fonction de la vitesse disponible à l'entrée du convergent.

Il avait été déjà montré (voir figure 2.12) que la vitesse de rotation sur l'axe du générateur ne dépend pas de la vitesse du vent disponible à l'entrée du convergent, mais uniquement du rapport de transmission des poulies. Donc l'allure horizontale des courbes se justifie bien.

En revanche, ce qui est intéressant à observer sur la figure 2, c'est la stratification des différentes courbes. Il est loisible de constater que plus (γ) est faible, plus la vitesse recueillie sur l'arbre est élevée.

L'observation de la figure 2 révèle que la vapeur d'eau produirait une vitesse de rotation de l'axe du générateur bien meilleure que l'air.

Il faut à présent examiner comment évolue le couple recueilli sur l'arbre du générateur.

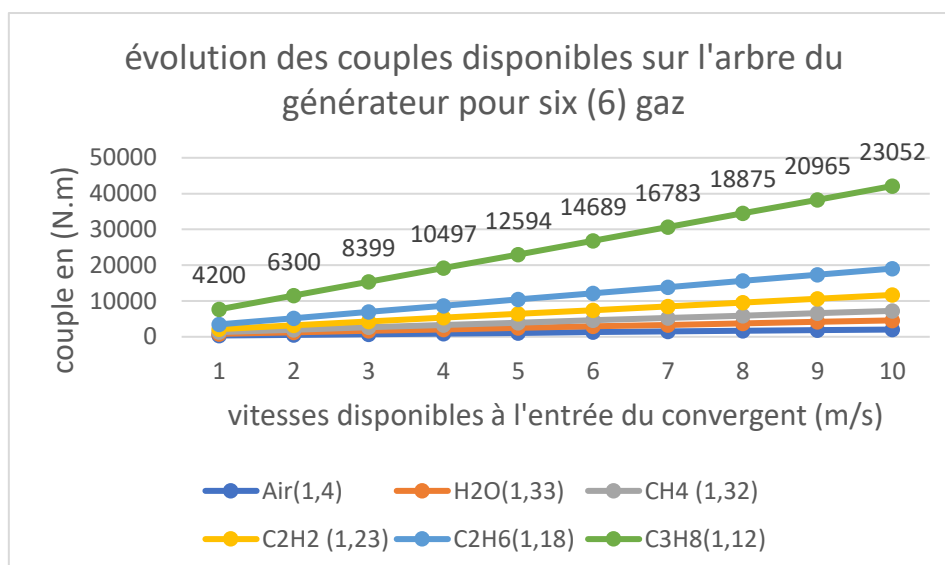


Figure 3: Classification des couples sur l'arbre d'un générateur pour différents gaz en fonction de la vitesse disponible à l'entrée du convergent.

Deux observations sont à noter sur la figure 3. Il s'agit d'une part de l'accroissement du couple sur l'axe du générateur avec la vitesse du vent disponible à l'entrée du convergent. D'autre part, pour une même vitesse du vent à l'entrée du convergent, le couple est plus élevé lorsque (γ) est faible. Plus concrètement, Air ($\gamma = 1,4$) produirait pour une même vitesse du vent, un couple sur l'arbre du générateur plus faible que l'Éthane ($\gamma = 1,18$) dans la même condition.

De tout ce qui vient d'être montré, il ne fait plus aucun doute que les puissances recueillies sur l'arbre du générateur devraient suivre la même tendance à savoir, plus (γ) est faible plus la puissance dégagée est élevée. C'est ce que la figure 4 devrait montrer.

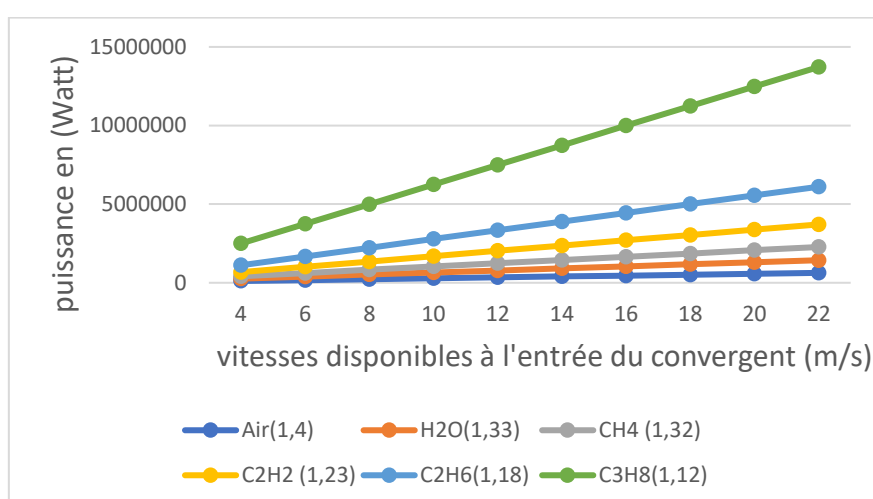


Figure 4: Classification des puissances sur l'arbre d'un générateur pour différents gaz en fonction de la vitesse disponible à l'entrée du convergent.

Si par exemple, il existe une source de production du Méthane, ou un gisement de ce gaz, il serait, par sa mise en œuvre, possible d'actionner un générateur beaucoup plus puissant que si s'était de l'air, donc une production d'énergie électrique beaucoup plus importante. D'ailleurs, une vapeur d'eau produirait une bien meilleure puissance que l'air. Mais l'avantage de l'air est qu'il est gratuit, pendant que les autres doivent être produits.

ANNEXE 3 : Tables des écoulements compressibles $\gamma=1.405$

M	$\frac{p}{p_0}$	$\frac{\rho}{\rho_0}$	$\frac{T}{T_0}$	$\frac{S}{S_c}$	c ($T_0 = 288 \text{ °K}$)
0,10	0,993 0	0,995	0,998 0	5,820	33,4
0,11	0,991 6	0,994	0,997 5	5,303	36,9
0,12	0,990 0	0,993	0,997 0	4,870	40,4
0,13	0,988 3	0,992	0,996 5	4,503	43,8
0,14	0,986 4	0,991	0,995 9	4,188	47,2
0,15	0,984 4	0,990	0,995 3	3,915	50,6
0,16	0,982 3	0,988	0,994 7	3,676	54,0
0,17	0,980 0	0,986	0,994 1	3,465	57,4
0,18	0,977 6	0,984	0,933 4	3,278	60,8
0,19	0,975 1	0,982	0,992 7	3,111	64,2
0,20	0,972 4	0,980	0,992 0	2,961	67,6
0,21	0,969 6	0,978	0,991 2	2,826	71,0
0,22	0,966 7	0,976	0,990 3	2,704	74,4
0,23	0,963 7	0,974	0,989 4	2,594	77,8
0,24	0,960 6	0,972	0,988 5	2,494	81,2
0,25	0,957 3	0,970	0,987 5	2,402	84,6
0,26	0,953 9	0,968	0,986 5	2,317	87,9
0,27	0,950 4	0,965	0,985 4	2,238	91,2
0,28	0,946 8	0,962	0,984 3	2,165	94,5
0,29	0,943 1	0,959	0,983 2	2,097	97,8
0,30	0,939 3	0,956	0,982 0	2,034	101,1
0,31	0,935 4	0,953	0,980 8	1,975	104,4
0,32	0,931 4	0,950	0,979 6	1,920	107,7
0,33	0,927 2	0,947	0,978 4	1,869	111,0
0,34	0,922 9	0,944	0,977 1	1,821	114,3
0,35	0,918 5	0,941	0,975 8	1,776	117,6
0,36	0,914 0	0,938	0,974 4	1,734	120,9
0,37	0,909 5	0,935	0,973 0	1,695	124,2
0,38	0,904 9	0,932	0,971 6	1,658	127,5
0,39	0,900 2	0,928	0,970 1	1,623	130,7
0,40	0,895 3	0,924	0,968 6	1,590	133,9
0,41	0,890 4	0,920	0,967 0	1,559	137,1
0,42	0,885 4	0,916	0,965 4	1,529	140,3
0,43	0,880 3	0,912	0,963 8	1,501	143,5
0,44	0,875 1	0,908	0,962 2	1,474	146,7
0,45	0,869,9	0,904	0,960 5	1,448	149,9
0,46	0,864 6	0,900	0,958 8	1,424	153,1
0,47	0,859 2	0,896	0,957 1	1,401	156,3
0,48	0,853 7	0,892	0,955 4	1,379	159,5
0,49	0,848 1	0,888	0,953 6	1,359	162,7
0,50	0,842 5	0,884	0,951 8	1,340	165,9
0,51	0,836 8	0,880	0,950 0	1,322	169,1
0,52	0,831 1	0,876	0,948 1	1,304	172,2
0,53	0,825 3	0,872	0,946 2	1,287	175,3
0,54	0,819 5	0,868	0,944 3	1,271	178,4
0,55	0,813 6	0,864	0,942 3	1,255	181,5

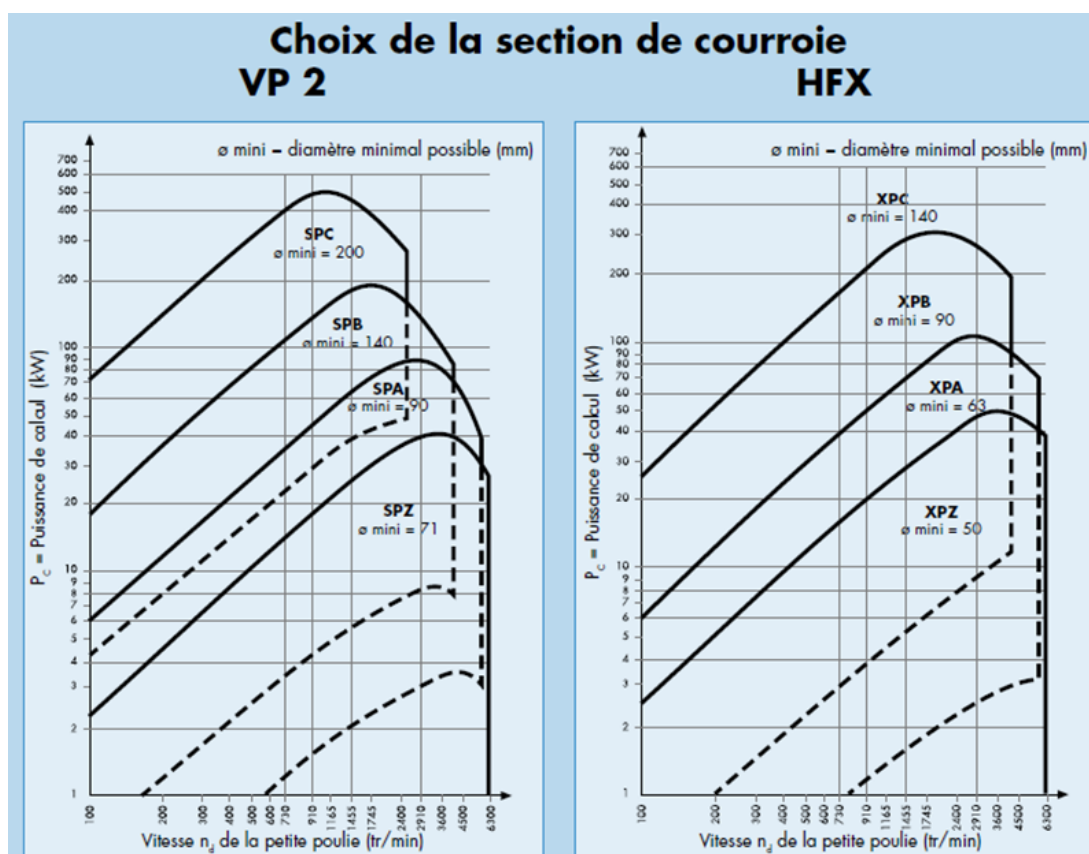
$\mathcal{M}$	$\frac{p}{p_0}$	$\frac{\rho}{\rho_0}$	$\frac{T}{T_0}$	$\frac{S}{S_c}$	c ($T_0 = 288 \text{ }^\circ\text{K}$)
0,56	0,807 7	0,860	0,940 3	1,240 0	184,6
0,57	0,801 7	0,856	0,938 3	1,226 0	187,7
0,58	0,795 6	0,851	0,936 3	1,212 6	190,8
0,59	0,789 5	0,846	0,934 2	1,199 8	193,9
0,60	0,783 4	0,841	0,932 1	1,187 6	197,0
0,61	0,777 2	0,836	0,930 0	1,176 0	200,0
0,62	0,771 0	0,831	0,927 9	1,165 0	203,0
0,63	0,764 8	0,826	0,925 8	1,154 5	206,0
0,64	0,758 5	0,821	0,923 6	1,144 5	209,0
0,65	0,752 2	0,816	0,921 4	1,135 0	212,0
0,66	0,745 9	0,811	0,919 2	1,125 9	215,0
0,67	0,739 5	0,806	0,916 9	1,117 3	218,0
0,68	0,733 1	0,801	0,914 6	1,109 1	221,0
0,69	0,726 7	0,796	0,912 3	1,101 3	224,0
0,70	0,720 2	0,791	0,909 9	1,093 9	227,0
0,71	0,713 8	0,786	0,907 5	1,086 9	229,9
0,72	0,707 3	0,781	0,905 1	1,080 3	232,8
0,73	0,700 8	0,776	0,902 7	1,074 0	235,7
0,74	0,694 3	0,771	0,900 3	1,068 0	238,6
0,75	0,687 8	0,766	0,897 9	1,062 3	241,5
0,76	0,681 3	0,761	0,895 4	1,056 9	244,4
0,77	0,674 8	0,756	0,892 9	1,051 8	247,3
0,78	0,668 3	0,751	0,890 4	1,047 0	250,2
0,79	0,661 8	0,746	0,887 9	1,042 5	253,1
0,80	0,655 3	0,741	0,885 4	1,038 2	255,9
0,81	0,649	0,736	0,882 8	1,034 2	258,7
0,82	0,642	0,730	0,880 2	1,030 4	261,5
0,83	0,636	0,724	0,877 6	1,026 9	264,3
0,84	0,629	0,718	0,875 0	1,023 7	267,1
0,85	0,623	0,712	0,872 4	1,020 7	269,9
0,86	0,616	0,707	0,869 8	1,017 9	272,7
0,87	0,610	0,702	0,867 2	1,015 3	275,5
0,88	0,603	0,697	0,864 5	1,012 9	278,3
0,89	0,597	0,692	0,861 7	1,010 7	281,0
0,90	0,590	0,687	0,859 0	1,008 7	283,7
0,91	0,584	0,681	0,856 3	1,006 9	286,4
0,92	0,577	0,675	0,853 6	1,005 4	289,1
0,93	0,571	0,670	0,850 9	1,004 1	291,8
0,94	0,565	0,665	0,848 2	1,003 0	294,5
0,95	0,559	0,660	0,845 4	1,002 1	297,2
0,96	0,553	0,655	0,842 7	1,001 4	299,9
0,97	0,547	0,650	0,839 9	1,000 8	302,5
0,98	0,540	0,645	0,837 2	1,000 4	305,1
0,99	0,534	0,640	0,834 4	1,000 2	307,7
1,00	0,528	0,635	0,831 6	1,000 0	310,3

ANNEXE 4 : Elements de calcul et de choix des courroies

Doc 1 : Facteur de service de la transmission

Facteurs de service S	Conditions de fonctionnement								
	8 heures/jour			16 heures/jour			24 heures/jour		
	Couple uniforme U	Couple variable V	Couple très variable TV	Couple uniforme U	Couple variable V	Couple très variable TV	Couple uniforme U	Couple variable V	Couple très variable TV
Moteur électrique usuel couple de démarrage normal	1	1,12	1,25	1,12	1,25	1,40	1,18	1,32	1,50
Démarrages fréquents ou inversions de sens fréquentes	1,12	1,25	1,40	1,25	1,40	1,60	1,32	1,40	1,70
Moteur électrique à couple de démarrage élevé ou moteur synchrone. Moteur diesel à 1 ou 2 cylindres	1,18	1,32	1,50	1,32	1,50	1,70	1,40	1,60	1,80
Inversions de sens ou démarrages fréquents avec moteur à fort couple de démarrage	1,32	1,50	1,70	1,50	1,70	1,90	1,60	1,80	2

Doc 2 : Diagramme de choix de la section de la courroie



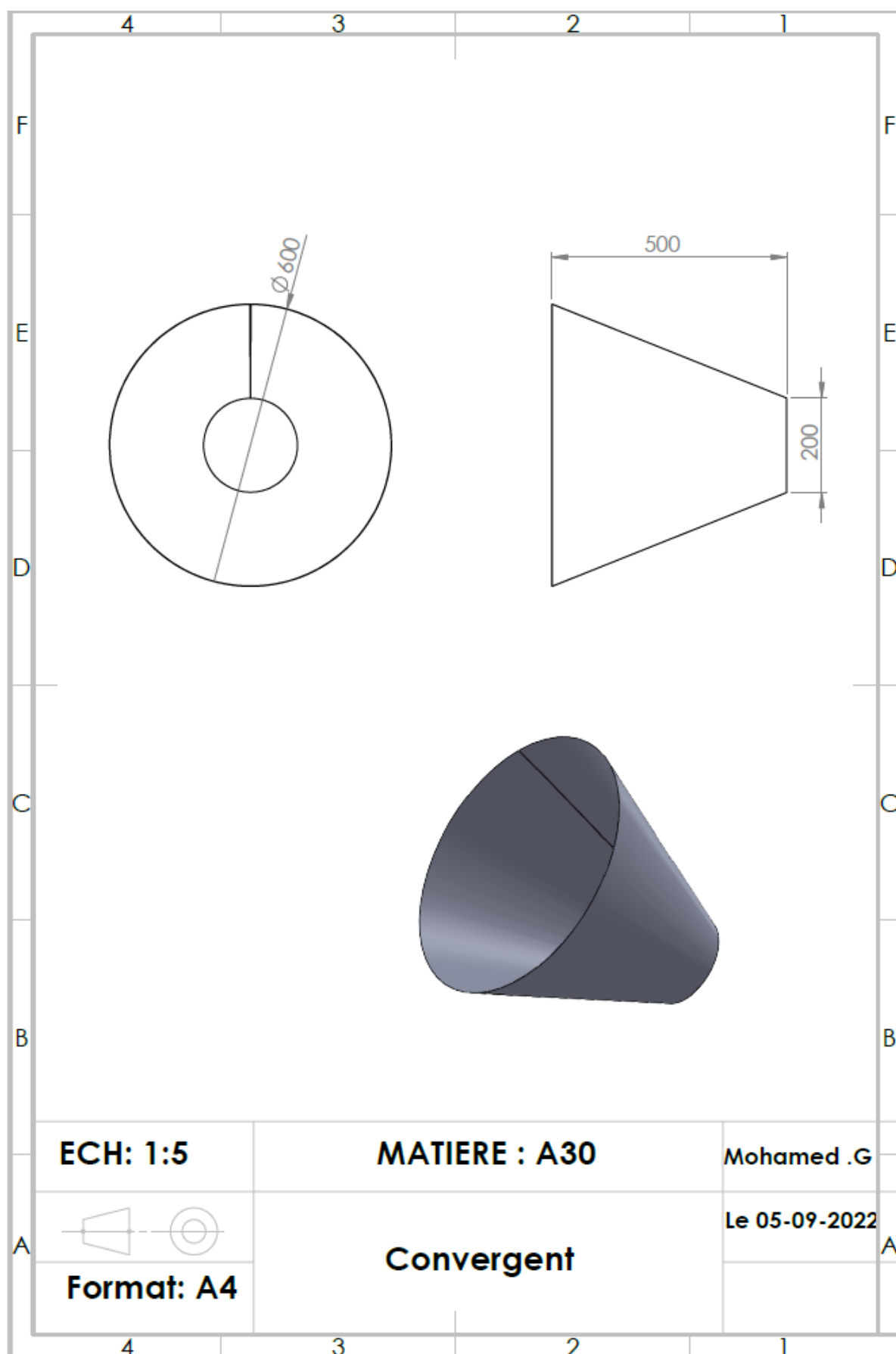
Doc 3 : Puissance brute transmissible pour une durée de vie théorique de 24000h

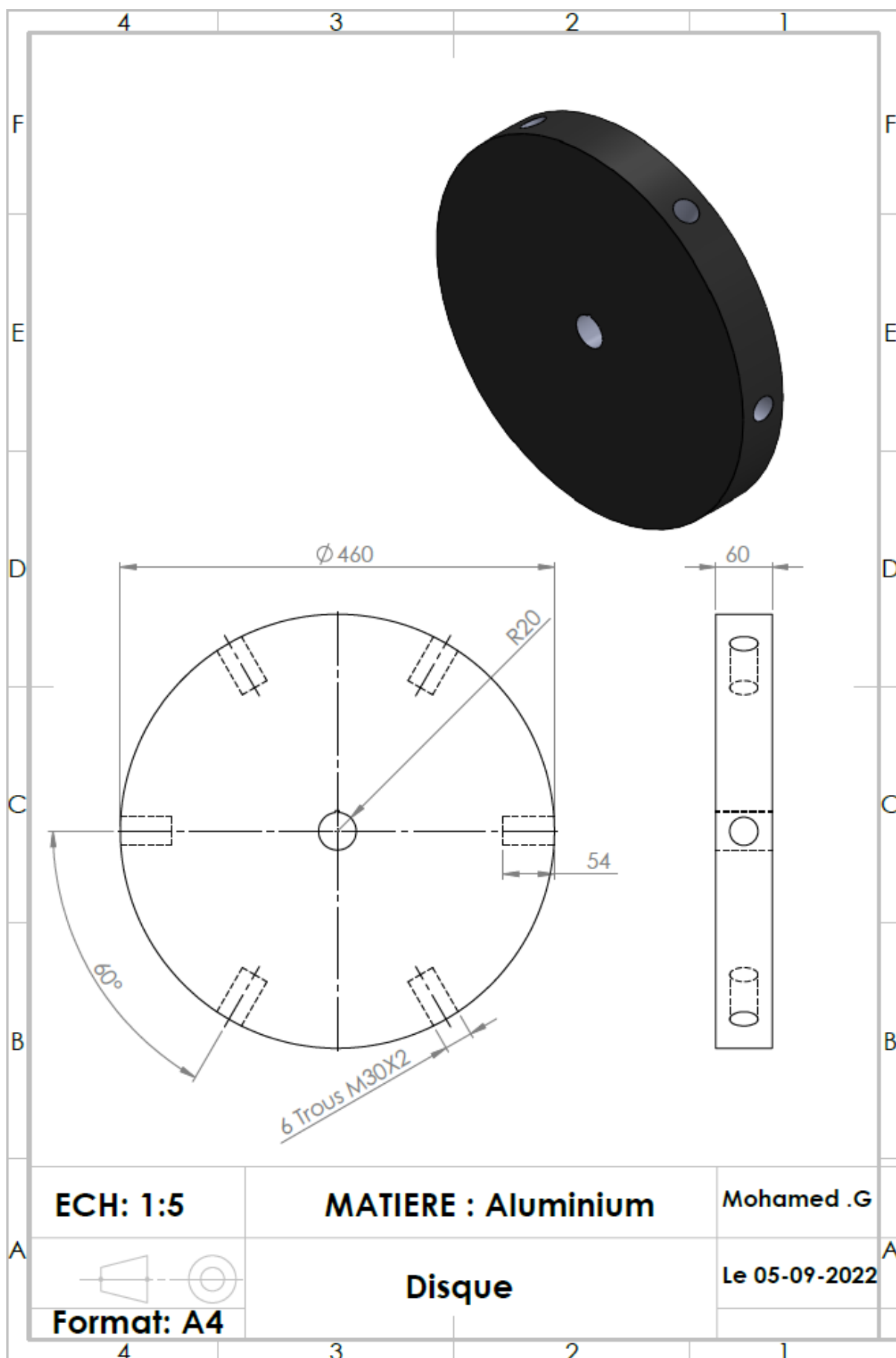
P ₀ = puissance brute transmissible (kW) pour L = 1600 mm et α = 180° (arc de contact)																					
n _d (tr/min)	R = $\frac{D}{d}$	d (mm) =																			
		50	56	63	71	75	80	85	90	95	100	106	112	118	125	132	140	150	160	180	200
200	R < 1,06	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
	1,06 à 1,11	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
	1,12 à 1,24	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
	1,25 à 1,59	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,1	1,3
	1,6 ≤ R	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,1	1,3
400	R < 1,06	0,3	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,7	1,8	2,0	2,3
	1,06 à 1,11	0,3	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,2	1,3	1,4	1,5	1,7	1,8	2,1	2,3
	1,12 à 1,24	0,3	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8	0,9	0,9	1,0	1,1	1,2	1,2	1,3	1,4	1,5	1,7	1,8	2,1	2,3
	1,25 à 1,59	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	2,1	2,4
	1,6 ≤ R	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9	1,0	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,9	2,1	2,4
730	R < 1,06	0,5	0,6	0,8	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,7	1,8	1,9	2,1	2,2	2,4	2,6	2,8	3,1	3,5	4,0
	1,06 à 1,11	0,5	0,6	0,8	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,6	1,7	1,8	2,0	2,1	2,3	2,4	2,6	2,9	3,1	3,5	4,0
	1,12 à 1,24	0,5	0,6	0,8	1,0	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,7	1,8	2,0	2,1	2,3	2,5	2,6	2,9	3,1	3,6	4,0
	1,25 à 1,59	0,5	0,6	0,8	1,0	1,1	1,2	1,4	1,5	1,6	1,7	1,9	2,0	2,2	2,3	2,5	2,7	2,9	3,1	3,6	4,0
	1,6 ≤ R	0,5	0,7	0,8	1,0	1,1	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	1,9	2,1	2,2	2,4	2,5	2,7	3,0	3,2	3,6	4,1
970	R < 1,06	0,6	0,7	1,0	1,2	1,3	1,5	1,7	1,8	2,0	2,1	2,3	2,5	2,7	2,9	3,1	3,3	3,6	3,9	4,5	5,1
	1,06 à 1,11	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,5	1,7	1,8	2,0	2,2	2,3	2,5	2,7	2,9	3,1	3,4	3,7	4,0	4,5	5,1
	1,12 à 1,24	0,6	0,8	1,0	1,3	1,4	1,6	1,7	1,9	2,0	2,2	2,4	2,5	2,7	2,9	3,2	3,4	3,7	4,0	4,6	5,1
	1,25 à 1,59	0,7	0,8	1,0	1,3	1,4	1,6	1,7	1,9	2,1	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,7	4,0	4,6	5,2
	1,6 ≤ R	0,7	0,8	1,1	1,3	1,5	1,6	1,8	1,9	2,1	2,3	2,5	2,6	2,8	3,0	3,3	3,5	3,8	4,1	4,7	5,3
1165	R < 1,06	0,7	0,8	1,1	1,4	1,6	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5	2,7	2,9	3,1	3,4	3,6	3,9	4,3	4,6	5,3	6,0
	1,06 à 1,11	0,7	0,9	1,1	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2	2,3	2,5	2,7	3,0	3,2	3,4	3,7	4,0	4,3	4,6	5,3	6,0
	1,12 à 1,24	0,7	0,9	1,2	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,5	3,7	4,0	4,3	4,7	5,4	6,0
	1,25 à 1,59	0,8	0,9	1,2	1,5	1,7	1,9	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,3	3,5	3,8	4,0	4,4	4,7	5,4	6,1
	1,6 ≤ R	0,8	1,0	1,2	1,6	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5	2,7	2,9	3,1	3,3	3,6	3,8	4,1	4,5	4,8	5,5	6,2
1455	R < 1,06	0,8	1,1	1,4	1,7	1,9	2,1	2,3	2,6	2,8	3,0	3,3	3,5	3,8	4,1	4,4	4,7	5,2	5,6	6,4	7,2
	1,06 à 1,11	0,8	1,1	1,4	1,7	1,9	2,2	2,4	2,6	2,8	3,1	3,3	3,6	3,8	4,2	4,5	4,8	5,2	5,6	6,5	7,3
	1,12 à 1,24	0,9	1,1	1,4	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,9	3,1	3,4	3,6	3,9	4,2	4,5	4,8	5,3	5,7	6,5	7,3
	1,25 à 1,59	0,9	1,1	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,2	3,4	3,7	3,9	4,3	4,6	4,9	5,3	5,7	6,6	7,4
	1,6 ≤ R	0,9	1,2	1,5	1,9	2,1	2,3	2,5	2,8	3,0	3,2	3,5	3,8	4,0	4,3	4,6	5,0	5,4	5,8	6,7	7,5
1745	R < 1,06	1,0	1,2	1,5	2,0	2,2	2,5	2,7	3,0	3,2	3,5	3,8	4,1	4,4	4,8	5,1	5,5	6,00	6,5	7,5	8,4
	1,06 à 1,11	1,0	1,2	1,6	2,0	2,2	2,5	2,8	3,0	3,3	3,6	3,9	4,2	4,5	4,8	5,2	5,6	6,1	6,6	7,5	8,4
	1,12 à 1,24	1,0	1,2	1,6	2,1	2,3	26,6	2,8	3,1	3,4	3,6	3,9	4,2	4,5	4,9	5,2	5,6	6,1	6,6	7,6	8,5
	1,25 à 1,59	1,1	1,3	1,7	2,1	2,3	2,6	2,9	3,2	3,4	3,7	4,0	4,3	4,6	5,0	5,3	5,7	6,2	6,7	7,6	8,6
	1,6 ≤ R	1,1	1,3	1,7	2,2	2,4	2,7	3,0	3,2	3,5	3,8	4,1	4,4	4,7	5,1	5,4	5,8	6,3	6,8	7,8	8,7
2400	R < 1,06	1,2	1,5	2,0	2,5	2,8	3,2	3,5	3,9	4,2	4,6	5,0	5,4	5,8	6,2	6,7	7,2	7,8	8,4	9,6	10,7
	1,06 à 1,11	1,2	1,5	2,0	2,6	2,9	3,3	3,6	4,0	4,3	4,7	5,1	5,5	5,9	6,3	6,8	7,3	7,9	8,5	9,7	10,8
	1,12 à 1,24	1,3	1,6	2,1	2,7	3,0	3,3	3,7	4,0	4,4	4,7	5,1	5,5	5,9	6,4	6,8	7,3	8,0	8,6	9,8	10,9
	1,25 à 1,59	1,3	1,6	2,2	2,8	3,0	3,4	3,8	4,1	4,5	4,8	5,2	5,6	6,0	6,5	6,9	7,4	8,1	8,7	9,9	11,0
	1,6 ≤ R	1,4	1,7	2,2	2,8	3,1	3,5	3,9	4,2	4,6	4,9	5,3	5,7	6,2	6,6	7,1	7,6	8,2	8,8	10,0	11,2
2910	R < 1,06	1,5	1,7	2,3	3,0	3,3	3,7	4,1	4,5	4,9	5,3	5,8	6,3	6,7	7,3	7,8	8,3	9,0	9,7	11,0	12,2
	1,06 à 1,11	1,5	1,8	2,4	3,1	3,4	3,8	4,2	4,6	5,0	5,4	5,9	6,4	6,8	7,4	7,9	8,4	9,2	9,8	11,1	12,3
	1,12 à 1,24	1,6	1,8	2,4	3,1	3,5	3,9	4,3	4,7	5,1	5,5	6,0	6,4	6,9	7,4	7,9	8,5	9,2	9,9	11,2	12,4
	1,25 à 1,59	1,6	1,9	2,5	3,2	3,6	4,0	4,4	4,8	5,2	5,6	6,1	6,6	7,0	7,6	8,1	8,7	9,4	10,1	11,4	12,6
	1,6 ≤ R	1,6	2,0	2,6	3,3	3,7	4,1	4,5	4,9	5,3	5,8	6,2	6,7	7,2	7,7	8,3	8,8	9,6	10,3	11,6	12,8
3600	R < 1,06	1,6	1,9	2,6	3,5	3,9	4,4	4,8	5,3	5,8	6,3	6,8	7,4	7,9	8,5	9,1	9,7	10,5	11,2	12,6	13,8
	1,06 à 1,11	1,6	2,0	2,8	3,6	4,0	4,5	5,0	5,4	5,9	6,4	6,9	7,5	8,0	8,6	9,2	9,8	10,6	11,4	12,7	13,9
	1,12 à 1,24	1,7	2,1	2,8	3,7	4,1	4,6	5,1	5,5	6,0	6,5	7,0	7,6	8,1	8,7	9,3	9,9	10,7	11,5	12,8	14,0
	1,25 à 1,59	1,8	2,2	3,0	3,8	4,2	4,7	5,2	5,7	6,2	6,6	7,2	7,7	8,3	8,9	9,4	10,1	10,9	11,6	13,0	14,2
	1,6 ≤ R	1,8	2,3	3,0	3,9	4,3	4,8	5,3	5,8	6,3	6,8	7,4	7,9	8,5	9,1	9,7	10,3	11,1	11,9	13,3	14,5
4500	R < 1,06	1,8	2,2	3,1	4,1	4,5	5,1	5,7	6,2	6,8	7,3	7,9	8,6	9,1	9,8	10,4	11,1	11,9	12,6		
	1,06 à 1,11	1,9	2,4	3,2	4,2	4,7	5,3	5,8	6,4	6,9	7,5	8,1	8,7	9,3	10,0	10,6	11,3	12,1	12,8		
	1,12 à 1,24	2,0	2,5	3,3	4,3	4,8	5,4	5,9	6,5	7,1	7,6	8,2	8,8	9,4	10,1	10,7	11,4	12,2	12,9		
	1,25 à 1,59	2,1	2,6	3,5	4,5	4,9	5,5	6,1	6,7	7,2	7,8	8,4	9,0	9,6	10,3	10,9	11,6	12,4	13,1		
	1,6 ≤ R	2,1	2,7	3,6	4,6	5,1	5,7	6,3	6,9	7,4	8,0	8,6	9,3	9,9	10,5	11,2	11,9	12,7	13,4		
6000	R < 1,06	2,1	2,6	3,6	4,8	5,4	6,1	6,8	7,4	8,0	8,6	9,3	9,9	10,5	11,2						
	1,06 à 1,11	2,2	2,8	3,8	5,0	5,6	6,3	7,0	7,6	8,2	8,8	9,5	10,1	10,7	11,4						
	1,12 à 1,24	2,3	2,9	4,0	5,2	5,7	6,4	7,1	7,8	8,4	9,0	9,7	10,3	10,9	11,5						
	1,25 à 1,59	2,4	3,0	4,1	5,4	5,9	6,6	7,3	8,0	8,6	9,2	9,9	10,5	11,1	11,8						
	1,6 ≤ R	2,4	3,2	4,3	5,5	6,1	6,9	7,6	8,2	8,9	9,5	10,2	10,9	11,5	12,1						

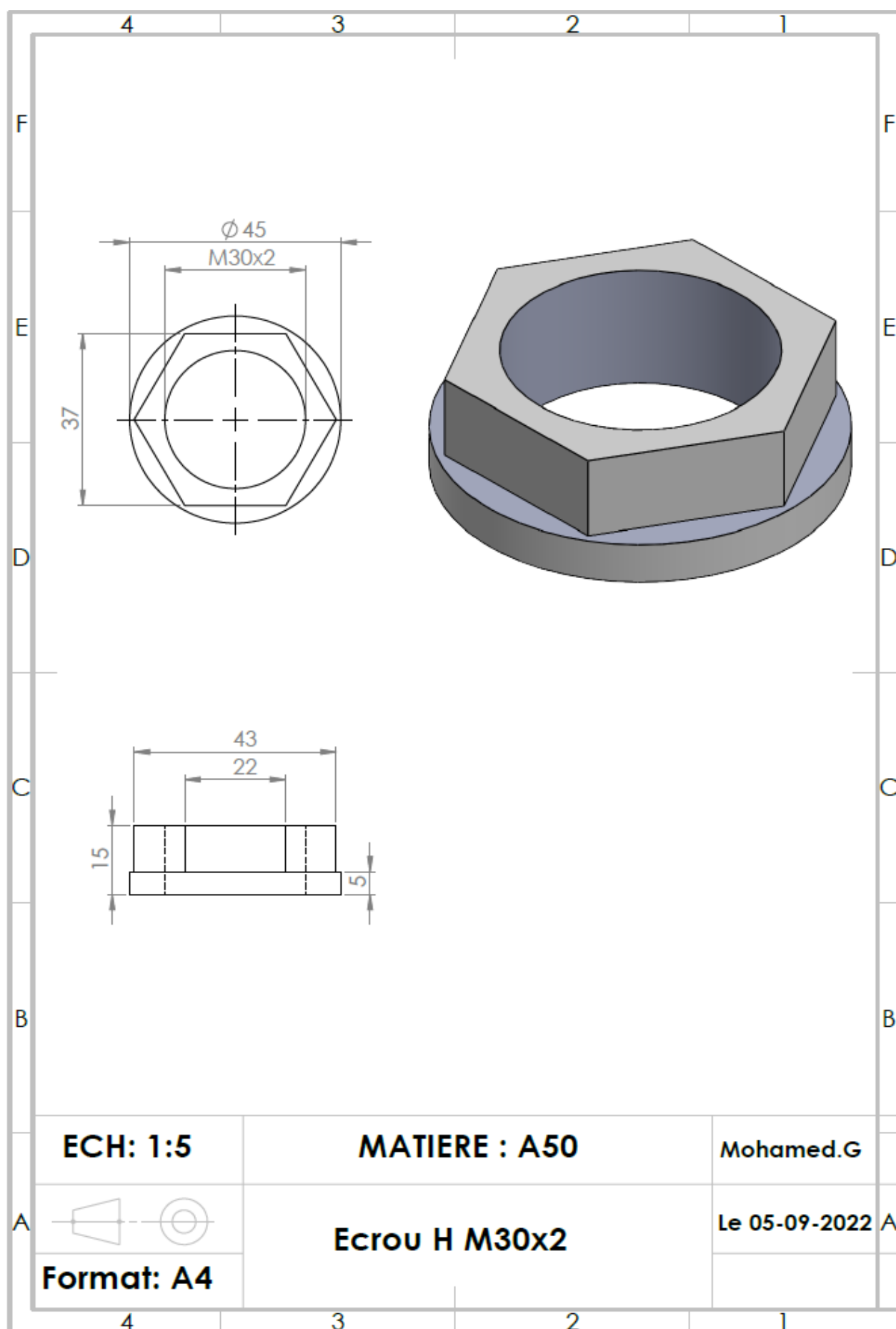
Vitesse linéaire supérieure à 32 m/s.
Veiller à l'équilibrage des poulies.

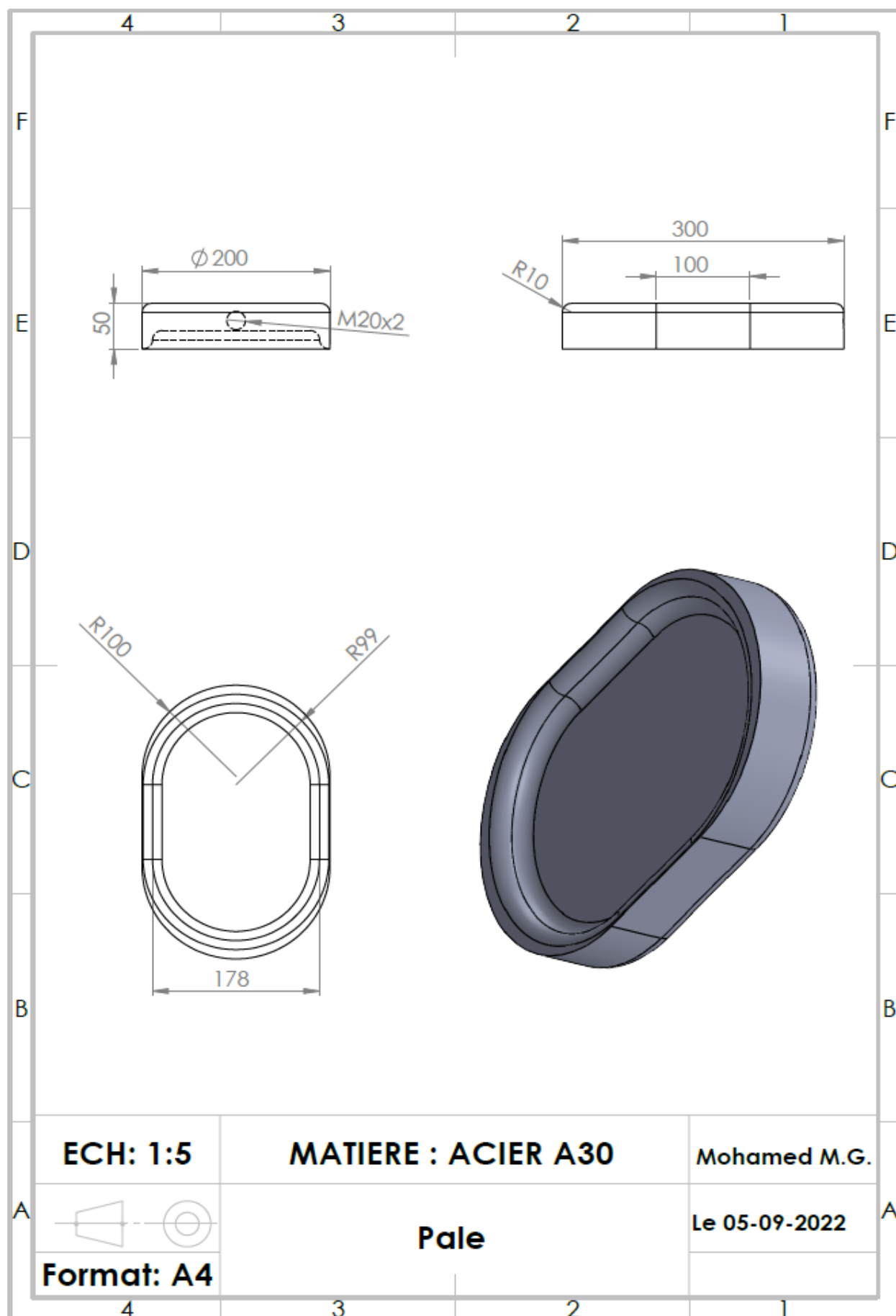
L (mm)	630	710	800	900	1000	1120	1250	1400	1600	1800	2000	2240	2500	2650	2800	3000	3150	3350	3550
C _L	0,87	0,89	0,91	0,93	0,95	0,97	0,98	0,99	1,00	1,03	1,05	1,07	1,08	1,09	1,10	1,11	1,12	1,13	1,14

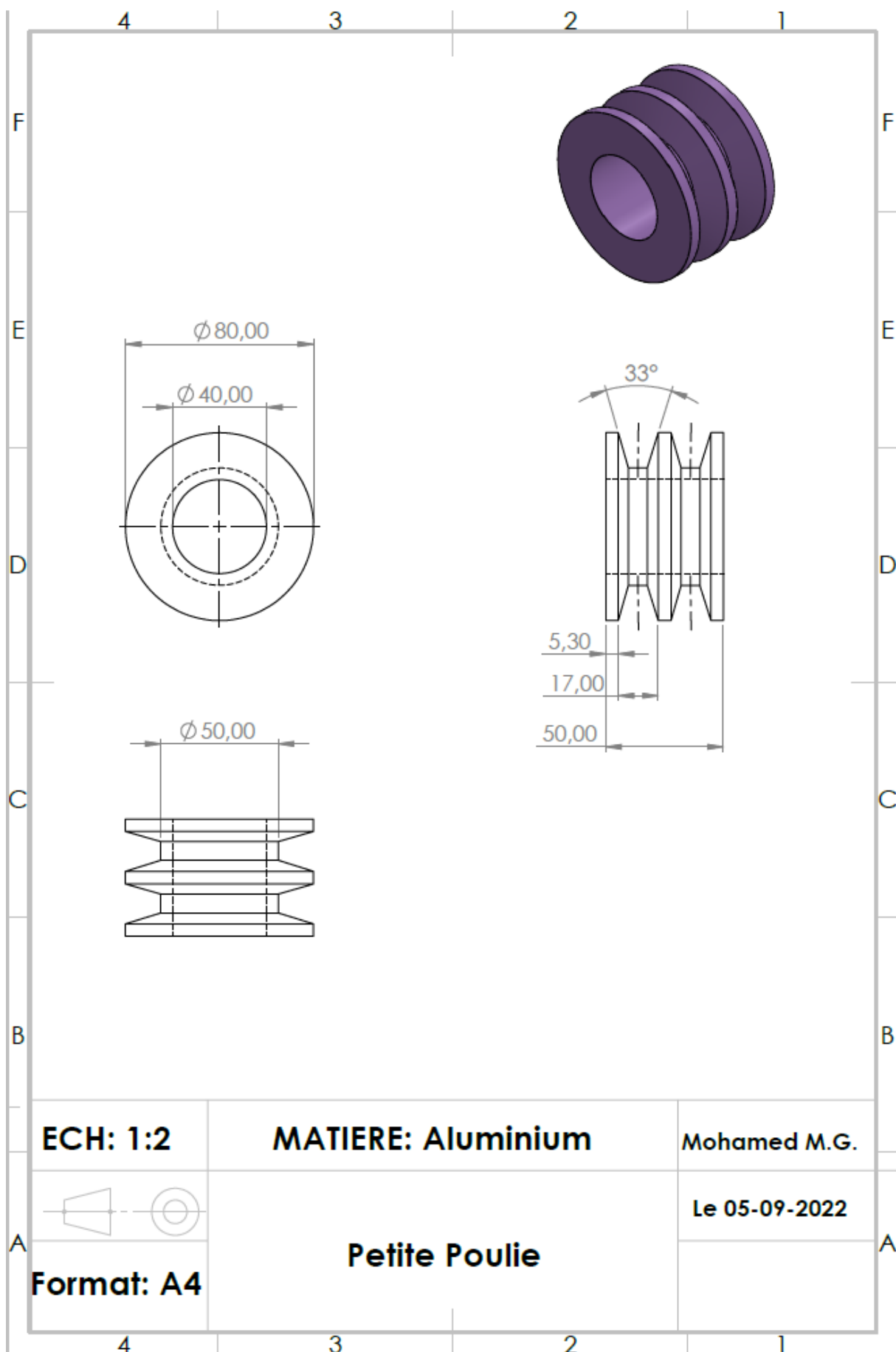
ANNEXE 5 : Dessin de définition des pièces et dessin d'ensemble

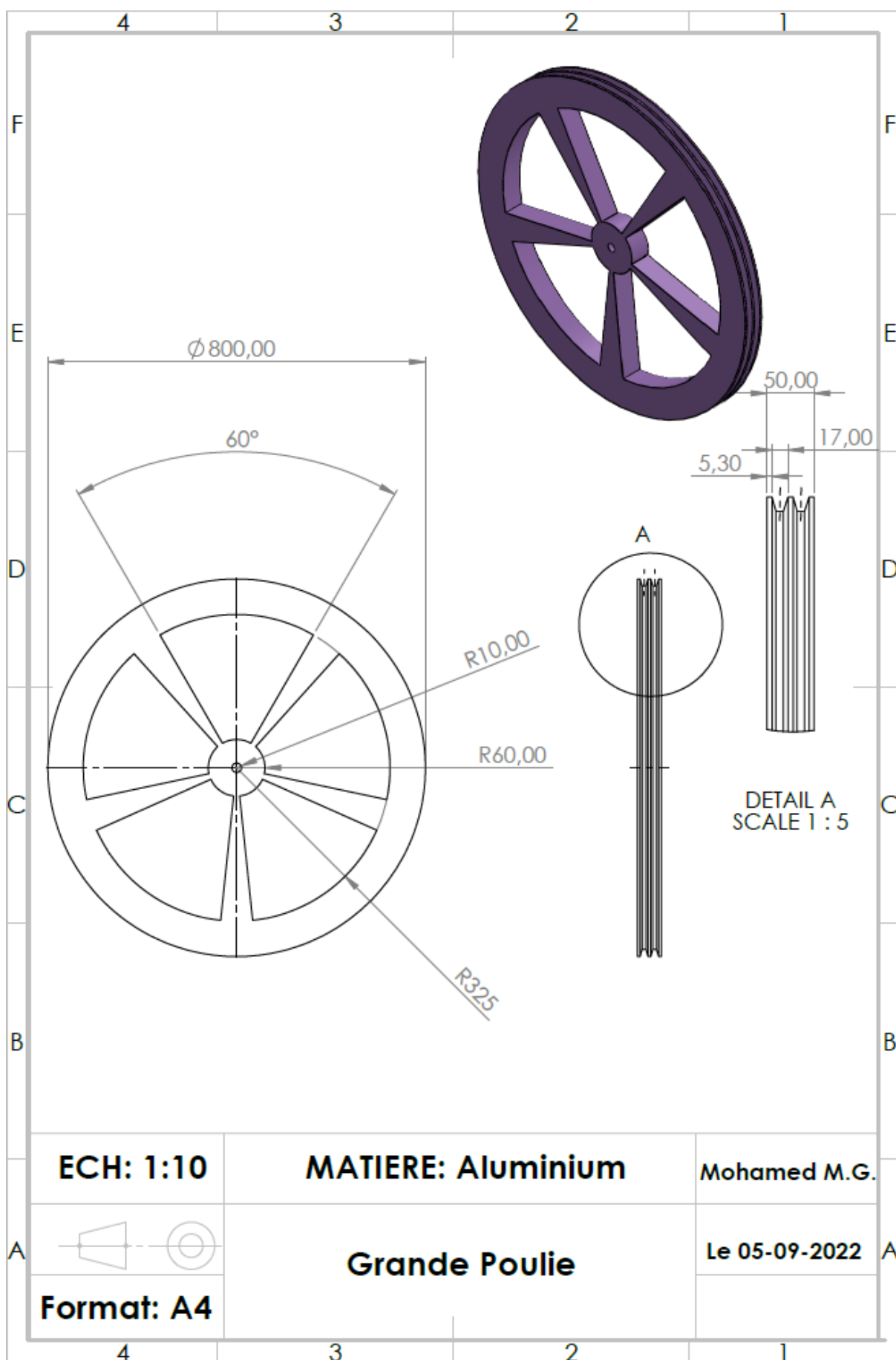


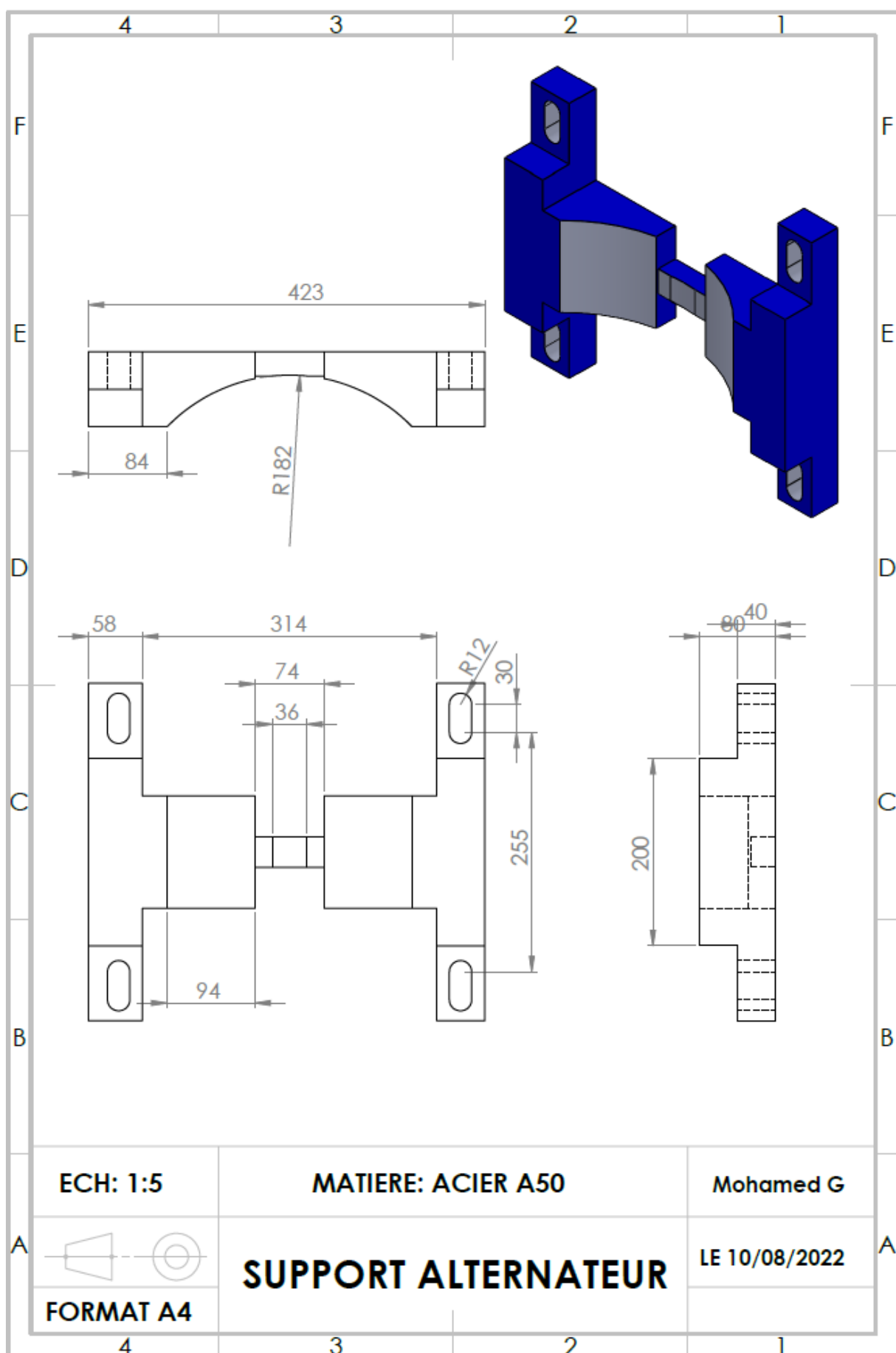


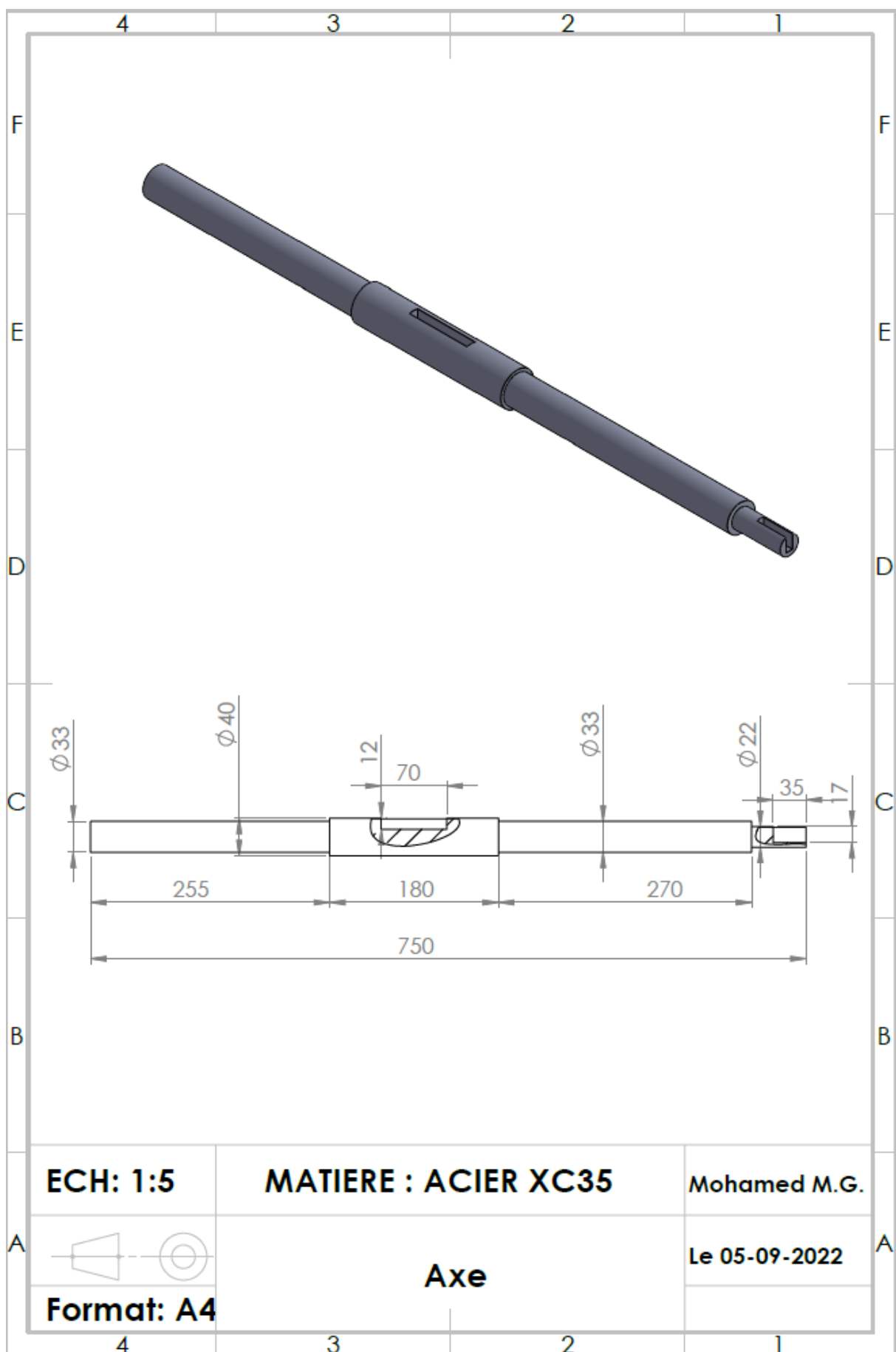


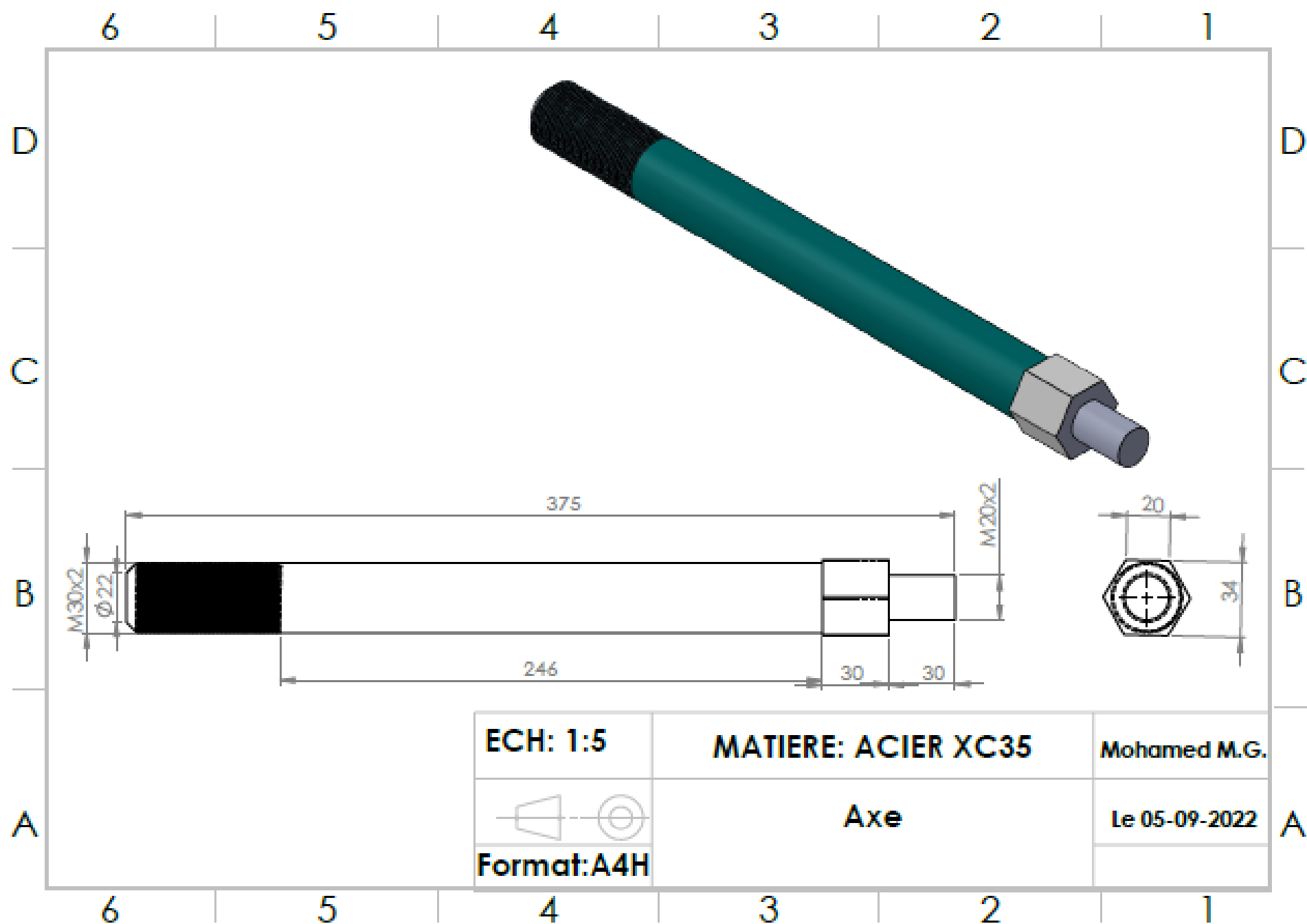


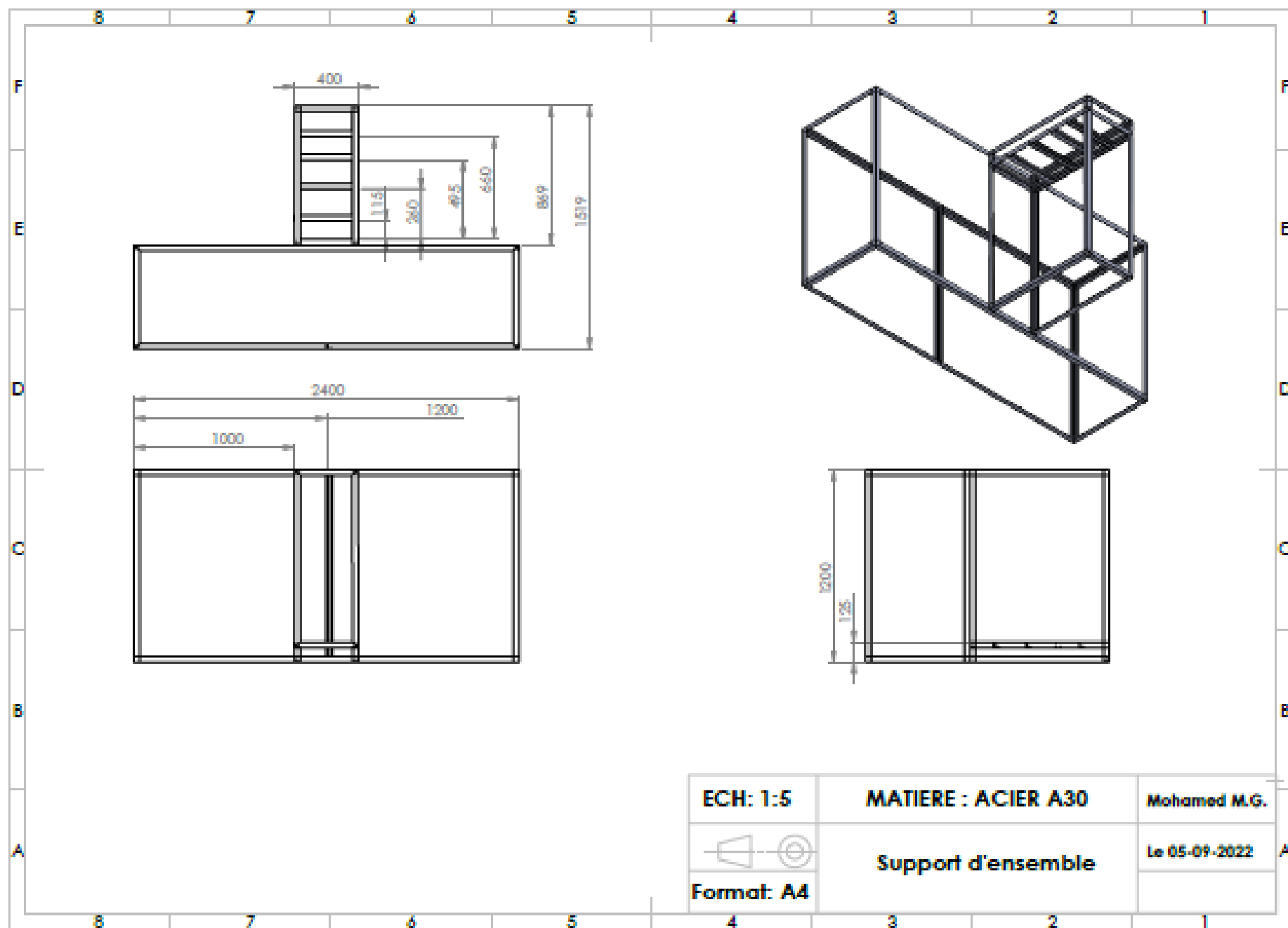


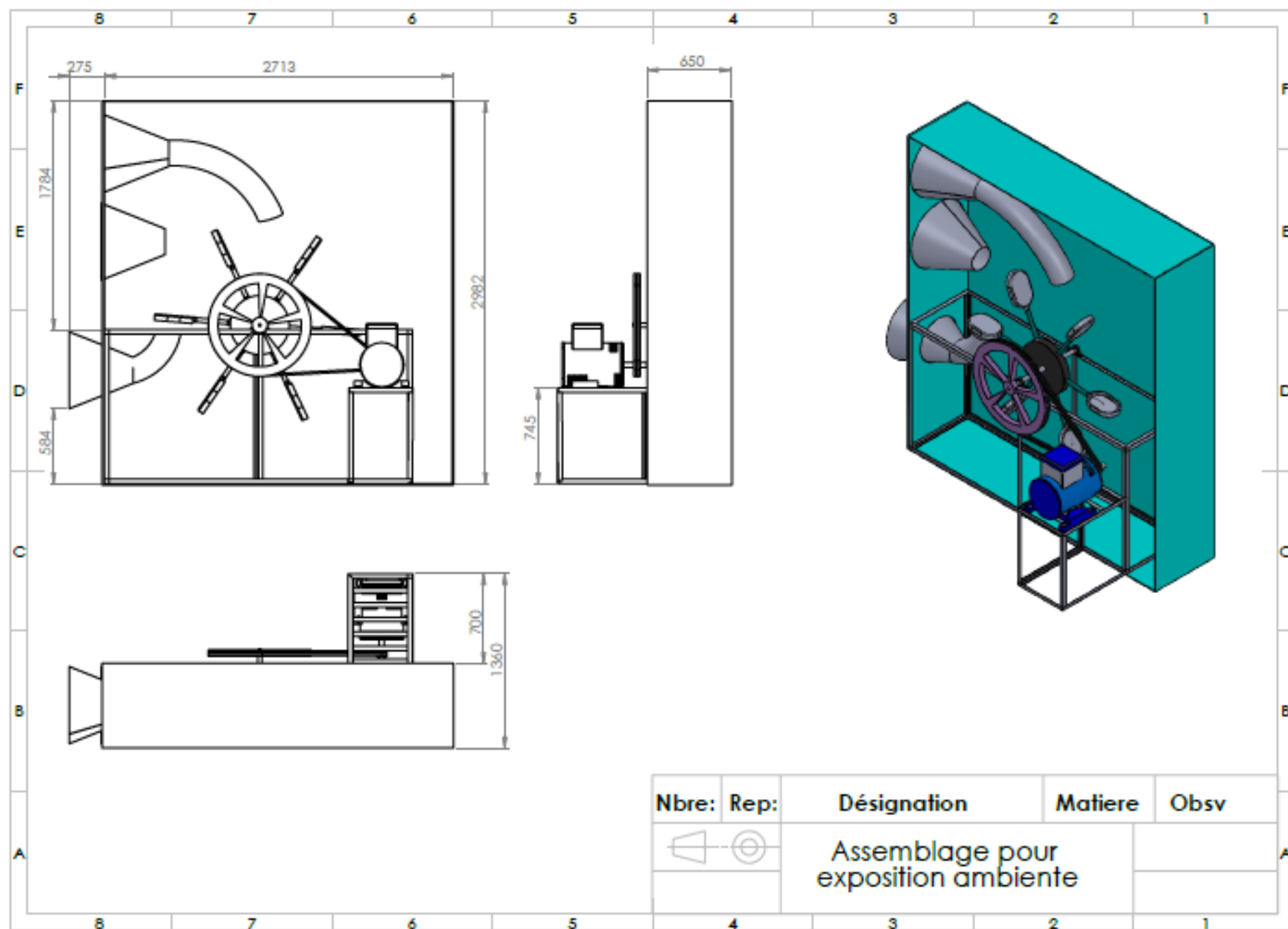


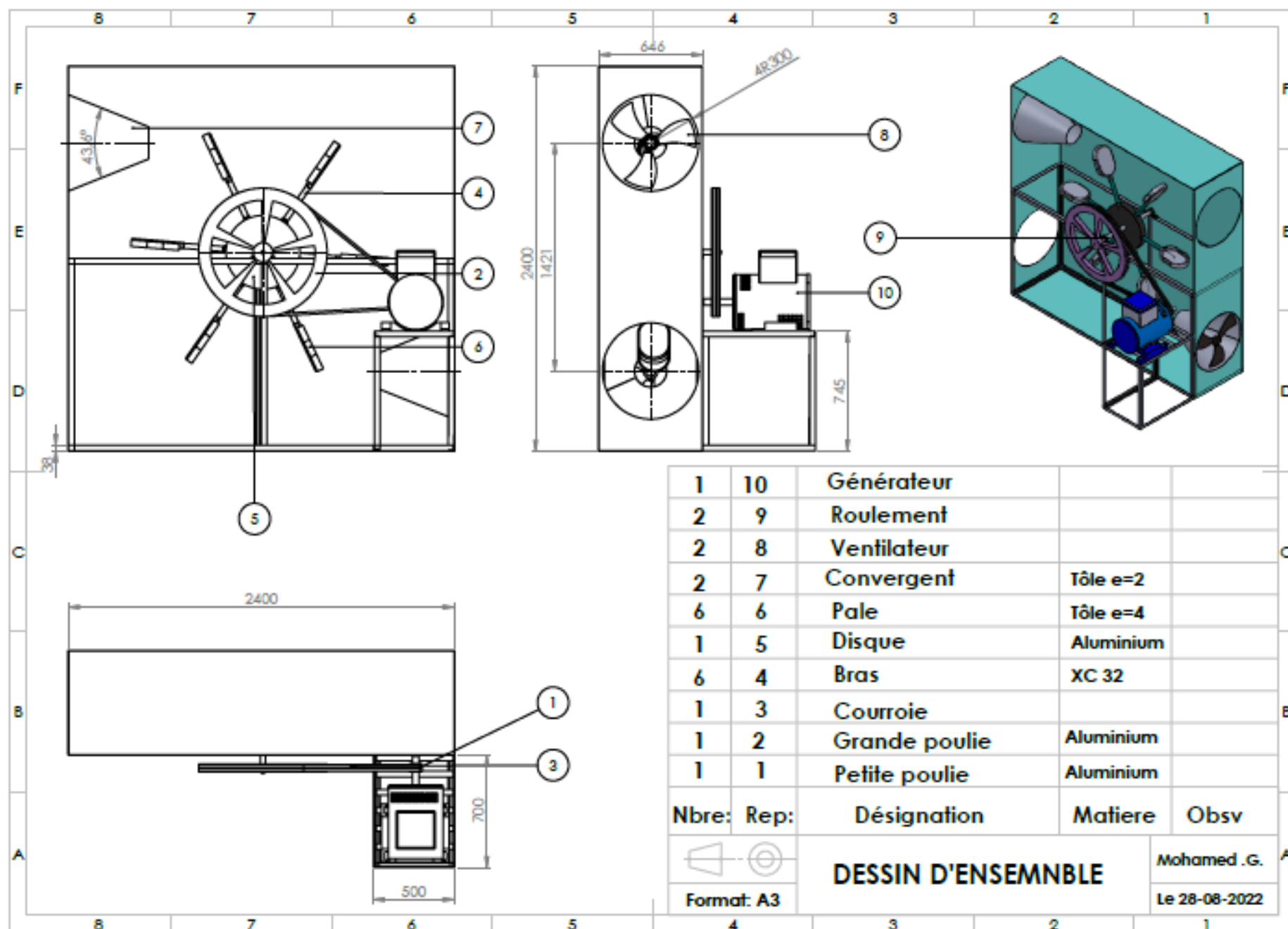












Dispositif réel fabriqué (quelques phases de réalisation, de montage et de découpe des composants)



Découpe du convergent



Moulage en fonderie de la poulie



Poulie usinée et montée



Disque massif montée (obtenu par moulage en fonderie et usinée sur tour parallèle)



Pale



ANNEXE 6 : Tableau qui recense quelques sources d'énergie et présente leurs avantages et inconvénients.

Source d'énergie	Avantages	Inconvénients
Solaire	- Non polluante ; - Source d'énergie la plus abondante qui soit ; - Durée de vie de 15 à 30 ans.	- Fort investissement initial (coût des cellules) ; - Dépendante d'un temps ensoleillé ; - Un complément d'énergie requis dans des zones peu ensoleillées ; - Forte occupation de l'espace.
Énergie éolienne	- Pas d'émissions ; - Abordable ; - Peu de perturbations des écosystèmes ; - Puissance de sortie relativement élevée.	- Puissance de sortie proportionnelle à la vitesse du vent ; - Pas disponible dans toutes les zones géographiques ; - Investissement initial conséquent/Frais récurrents de maintenance ; - Occupation importante de l'espace.
Hydraulique	- Pas d'émissions ; - Fiable ; - Capable de générer une puissance de sortie considérable ; - La puissance de sortie est modulable.	- Impacts environnementaux dus aux modifications subies par l'environnement dans la zone du barrage ; - Les barrages hydroélectriques coûtent cher ; - Les barrages sont susceptibles d'être affectés par la sécheresse.
Gaz naturel	- Largement disponible ; - Le plus propre des énergies fossiles ; - Souvent utilisé en combinaison avec d'autres combustibles pour diminuer la pollution dans la production d'électricité ; - Sécurité renforcée avec l'ajout d'odeur artificielle afin que les	- Coûts de transport élevés ; - Le manque d'infrastructures rend les ressources de gaz non disponibles à partir de certaines zones ; - Émissions polluantes ; - Les oléoducs ont un impact sur l'écosystème.

	gens puissent facilement sentir le gaz en cas de fuite.	
Pétrole	- Entre dans la fabrication de plusieurs produits, des médicaments aux plastiques ; - Production économique ; - Facile à transporter.	- Fortes émissions de CO₂ ; - Se trouve dans des régions limitées ; - Approvisionnement probablement épuisé avant les ressources en charbon et gaz naturel ; - Impact environnemental possible dû au forage et au transport.
Biocarburants	- Ressources abondantes ; - Moins d'émissions que les sources d'énergie fossiles ; - Utilisable dans les moteurs Diesel ; - Les moteurs d'automobiles sont facilement convertibles pour utiliser de la biomasse.	- La source de production doit être à proximité des installations de consommation pour diminuer les coûts de transport ; - Émet quelques déchets polluants sous forme de gaz et de liquide ; - Augmente les émissions d'oxydes d'azote, un polluant de l'air.
Charbon	- Bonne répartition géographique ; - Transport facile ; - Flexible ; - Démarrage rapide ; - Stockable ; - Abondant.	- Quantités importantes d'émissions de gaz à effet de serre ; - Impact environnemental important lors de l'extraction et de la combustion mais des technologies de combustion plus propres sont en cours d'élaboration ; - Activités minières dangereuses pour les mineurs.
Uranium	- Extraction bon marché ; - Fiable et susceptible de générer d'importantes quantités de puissance.	- Investissements initiaux importants, en raison des contraintes liées à la sécurité et au confinement ; - L'eau chauffée des déchets des centrales nucléaires nuit à la vie aquatique ; - Problème de stockage à long terme

		des déchets radioactifs ; - Problème potentiel de prolifération nucléaire.
Géothermie	- Pas d'émissions de gaz à effet de serre ou de CO ; - Efficace pour la transformation de l'énergie en électricité ; - Les réserves d'uranium sont abondantes ; - Ravitaillement annuel à la différence des centrales au charbon qui doivent être alimentées chaque jour ; - Un impact environnemental minimal ; - Efficace ; - Les centrales électriques produisent de faibles émissions ; - Faible coût après l'investissement initial.	- Champs géothermiques disponibles dans quelques régions du monde ; - Coûts de démarrage importants ; - Risque d'épuisement des puits.