

Visa du chef de département des
Sciences et Technologies
Signature:.....
Date:.....

Etude et conception d'un banc d'essai d'une éolienne

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de master académique en
«**Installations Energétiques**»

Encadreur: Dr. HAMDI Amine
Signature:
Date:

Réalisé par : BENYAMINA Mohamed
Signature:

Membres du jury :

Dr. BAGHDAD Mohamed (*Président*)

Dr. MERGHACHE Sidi Mohammed (*Examineur*)

Dr. HAMDI Amine (*Encadreur*)

Remerciement

En préambule à ce mémoire nous remerciant ALLAH qui nous aide et nous donne la patience et le courage durant ces longues années d'étude. Ces remerciements vont tout d'abord au corps professoral et administratif de centre universitaire Ahmed Ben Yahia El Wancharissi, Tissemsilt, pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploient de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.

Le travail présenté dans ce mémoire a été dirigé par Monsieur **Dr. HAMDI AMINE**. Nous tenons à lui exprimer toute notre gratitude et notre reconnaissance d'avoir proposé et dirigé ce travail, leurs qualités humaines, leur esprit critique et particulièrement leurs conseils et leurs orientations ont apporté beaucoup à l'aboutissement de ce travail.

On n'oublie pas nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours encouragés au cours de la réalisation de ce travail.

Dédicace

Mes très chers parents et chère famille, en signe d'amour, de respect et de reconnaissance, pour tous les sacrifices qu'ils ont consentis pour mon éducation et mon bien être.

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon grand amour mon estime, ma vie gratitude, mon intime attachement et ma profonde affection.

A tous les membres de ma famille

A mon encadreur Dr. HAMDI Amine

A mes professeurs

A mes amis.

SOMMAIRE

Remerciement.....	02
Dédicace.....	03
Sommaire.....	04
Liste des figures.....	05
Liste des tableaux.....	06
Symboles	07
Introduction générale.....	09

CHAPITRE I

1.1 Introduction.....	11
1.2 Définition de l'énergie.....	11
1.3 Définition de l'énergie renouvelable.....	11
1.4 Différence entre l'énergie non renouvelable et l'énergie renouvelable.....	11
1.5 Classement des énergies renouvelables.....	12
1.6 Avantages et inconvénients des énergies renouvelables.....	17
1.6.1 Avantages.....	17
1.6.2 Inconvénients.....	17
1.7 Energie renouvelable dans le monde.....	17
1.8 Energie renouvelable en Algérie.....	19

CHAPITRE II

2.1 Introduction.....	24
2.2 Historique.....	24
2.2.1 Pionniers de l'énergie éolienne destinée à la production d'électricité.....	24
a) Charles F. Brush (1849-1929) – USA.....	24
b) Poul La Cour (1846-1908) – DK.....	24
c) Georges Darrieus – F.....	24
d) Johannes Juul – DK.....	25
2.2.2 Etapes principales.....	25
2.3 Energie éolienne.....	27
2.3.1 Définition.....	27
2.3.2 Principe de fonctionnement.....	28

2.3.3 Avantages et inconvénients.....	28
a) Avantages.....	28
b) Inconvénients.....	29
2.3.4 Différentes types d'éolienne.....	29
a) Eoliennes à axe vertical.....	29
b) Eoliennes à axe horizontal.....	31
2.4 Constitutions d'une éolienne.....	32
2.4.1 Mat.....	33
2.4.2 Rotor.....	33
2.4.3 Nacelle.....	33
2.5 Caractéristiques du vent et des turbines (loi de Betz).....	35
2.6 Situation de l'énergie éolienne en Algérie.....	37
2.7 Conclusion.....	38

CHAPITRE III

3.1. Introduction.....	40
3.2 Démarche de la conception.....	40
3.2.1 Fonction principale.....	40
3.2.2 Fonctions partielles.....	40
3.2.3 Cahier des charges.....	40
3.3 Solutions proposées.....	41
3.3.1 Choix du banc.....	41
3.3.2 Choix du moteur.....	42
3.3.3 Choix du variateur de vitesse (multiplicateur).....	44
3.3.4 Choix de la génératrice.....	45
3.3.5 Schéma cinématique.....	47
3.4 Dimensionnement.....	47
3.4.1 Dimensionnement des arbres.....	47
a) Dimensionnement de l'arbre (1).....	48
b) Dimensionnement de l'arbre (2).....	49
3.4.2 Choix et vérification des clavettes.....	50
a) Pression spécifique.....	52
b) Contrainte de cisaillement de la clavette	52
3.4.3 Éléments géométriques des roues cylindriques à denture droite.....	53
a) Dimensionnement des roues dentées.....	54
b) Calcul des forces dans l'engrenage cylindrique à denture droites.....	55

c) Vérification de la résistance de la denture des roues dentées.....	56
3.4.4 Dimensionnement des roulements de l'arbre.....	57
a) Contrôle des roulements de l'arbre (1).....	58
b) Contrôle des roulements de l'arbre (2).....	59
3.5 Conclusion.....	59
Conclusion générale.....	60
Référence.....	61
Annexe1	63
Annexe 2.....	64
Annexe 3.....	65
Annexe 4.....	66
Annexe 5.....	67
Résumé	

Liste des figures

Fig. 1 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	12
Fig. 2 : Principe de fonctionnement de conversion thermique des rayons solaire	13
Fig. 3 : Principe de conversion énergie de la biomasse.....	14
Fig. 4 : Principe de conversion de l'énergie hydraulique.....	15
Fig. 5 : Principe d'exploitation de l'énergie géothermie.....	16
Fig. 6 : Principe de la conversion de l'énergie éolienne.....	16
Fig. 7 : Répartition des sources primaires d'énergie dans le monde	18
Fig. 8 : Carte de l'irradiation globale directe annuelle moyenne (période 2002-2011).....	20
Fig. 9 : Carte du vent annuel moyen à 50 m (période 2001-2010).....	21
Fig. 10 : Eolienne fonctionnement.	27
Fig. 11 : conversion d'énergie cinétique de vent dans une éolienne	27
Fig. 12 : Principe de fonctionnement d'une éolienne.....	28
Fig. 13 : Principales technologie des éoliennes.....	29
Fig. 14 : Principe de mise en mouvement (Trainée différentielle).....	30
Fig. 15 : Rotor de Savonius.....	30
Fig. 16 : Principe de l'incidence variable.....	31
Fig. 17 : Capteur à axe horizontal (a. Éolienne aval ; éolienne amont)	31
Fig. 18 : L'éolienne Offshores	32
Fig. 19 : Éléments constituant une éolienne Nord ex N60 (1300 kW).....	34
Fig. 20 : Prince de la loi de Betz.	35
Fig. 21 : Courbe de coefficient de puissance C_p	36
Fig. 22 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes	37
Fig. 23 : Carte du potentiel éolien en Algérie	38
Fig. 24 : Organigramme des exigences techniques, économiques et opérationnelles.....	41
Fig. 25 : Multiplicateur réalisé par SolidWorks.....	46
Fig. 26 : Schéma représentatif du banc d'essai.	47
Fig. 27: Schéma représentatif du multiplicateur.	47
Fig. 28 : Arbre 1 réalisé par SolidWorks.	48
Fig. 29 : Arbre 2 en 3D réalisé par SolidWorks.....	49
Fig. 30 : Formes des clavettes normalisés et clavetage parallèle.	51
Fig. 31: Clavette parallèle et leurs dimensions.....	51
Fig. 32 : Nomenclature d'un engrenage cylindrique.....	53

Liste des Tableaux

Tab. 1 : Récapitulatif des émissions de CO2 à éviter à l'horizon 2030.	20
Tab. 2 de répartition les ER de la période 2015-2030 en Algérie.	22
Tab. 3 : Comparaison des bancs éoliens.....	42
Tab. 4 : Comparaison des moteurs électriques.....	43
Tab. 5: Comparaison des variateurs de la vitesse.....	44
Tab. 6 : Comparaison de génératrices.	45
Tab. 7 : Rendements de quelques couples de frottement	50
Tab. 8 : Résultat et éléments géométriques des roues cylindriques à denture droite.	55

Symboles

V_l	vitesse du vent après passage à travers le rotor
m	La masse d'air
E_c	énergie cinétique
P_v	Puissance
C_p	coefficient de puissance
P_m	La puissance mécanique
d	Diamètre de l'arbre
M_t	Moment de torsion de l'arbre
$\tau_{t adm}$	Contrainte de torsion admissible
τ_t	Contrainte de torsion pour le matériau
S_t	Coefficient de sécurité
L	longueur de clavette
B	largeur de clavette
t_1 et t_2	hauteur de contact dans l'arbre et dans le moyeu.
P_{adm}	Pression spécifique admissible
σ_f	Contrainte de flexion pour un matériau
S_t	Coefficient de sécurité
$\sigma_{t adm}$	Contrainte de traction admissible
P	le pas
h_a	Saillie de la dent
h_f	Creux de la dent
h	Hauteur de la dent
d	Diamètre primitif
d_a	Diamètre de têt
d_f	Diamètre de pied
d_b	Diamètre de bas
a	Entraxe
α	Angle de pression
F_n	la force normale
F_t	la force tangentielle
F_r	la force radiale
σ_f	l'effort unitaire de flexion au pied de la dent
Y_f	le facteur de forme de la dent
K_A	facteur de charge dynamique extérieur

K_v	facteur dynamique intérieur
K_{β}	facteur de la distribution longitudinale de la charge
K_{α}	facteur de la répartition frontale de la charge
S_f	facteur de sécurité pour la sollicitation au pied de la dent
K_{FN}	facteur de nombre de cycles de sollicitation au pied de la dent
Y_s	facteur de concentration des contraintes
Y_f	facteur dimensionnel.
f_L	Coefficient de durée de vie
f_Z	Coefficient supplémentaire des efforts dynamique
f_t	Coefficient de température
f_n	Coefficient de nombre de tours
f_H	Coefficient de dureté

Introduction générale

Dans un monde variable et qui se développe rapidement, le besoin à de nouvelles sources d'énergies est nécessaire pour la production d'électricité. A cause du tarissement de l'énergie fossile dans le monde, les chercheurs s'intéressent de plus en plus à d'autres sources d'énergie dites renouvelables au détriment des sources d'énergie traditionnelle.

L'énergie éolienne est la plus économique puisque le vent est gratuit et son développement est en forte croissance comme source d'énergie propre, mais les frais principaux pour la production de l'énergie éolienne a puissance du vent sont la construction et la maintenance. L'éolienne nécessite périodiquement certaines maintenances afin d'assurer une durée de vie acceptable.

L'arrêt d'une installation pour des opérations de maintenance non prévues (casse, défaillances) entraîne des coûts très importants. La boîte de vitesse, les pales sont les parties les plus sollicitées.

L'étude des pannes sur les éoliennes nécessite des moyennes sophistiqués et un temps très important. Il est presque impossible d'installer une éolienne dans un laboratoire, vue le manque d'espace et les conditions de fonctionnement de cette dernière, pour cette raison nous devons étudier de banc d'essai qui donnent une idée sur la fonction principale de l'éolienne.

Dans ce travail, nous proposons de faire l'étude et la conception d'un banc d'essai qui donne l'image mécanique d'une petite éolienne.

Pour cela, ce mémoire est organisé en trois chapitres incluant la présente introduction générale et une conclusion générale :

➤ Le premier chapitre décrit la différence entre l'énergie non renouvelable et l'énergie renouvelable, le classement des énergies renouvelables et les avantages et les inconvénients de chaque énergie.

➤ Le deuxième chapitre a pour objet d'étude de l'énergie éolienne, la description des différents types d'éoliennes, leurs caractéristiques technologiques et leurs constitutions d'une éolienne.

➤ Le troisième chapitre est consacré au choix des différents composants du notre banc d'essai, sa conception de ses différents éléments, ainsi que leurs calculs nécessaires pour le dimensionnement et le contrôle de résistance des différents éléments.

CHAPITRE I :

LES ENERGIES RENOUVELABLES

1.1 Introduction

La demande de l'énergie est augmentée plus en plus surtout dans les pays développés pour assurer des buts économiques comme l'augmentation rapide des activités industrielles et l'investissement des entreprises, aussi pour atteindre l'équilibre énergétique face à l'évolution démographique, cette augmentation se traduit en réalité avec la croissance de prix du carburant qui représente la source la plus importante de l'énergie actuellement.

L'énergie est l'un des moteurs du développement des sociétés, sa production peut s'effectuer grâce à la valorisation de plusieurs ressources : la combustion de ressources fossiles comme le pétrole, le charbon et le gaz, la combustion de l'uranium qui permet la production de l'énergie nucléaire, qui n'est pas disponible pour tous les pays car des raisons politiques, financières et sa dangerosité au niveau écologique. Ainsi que la valorisation de ressources renouvelables. [1]

Les gouvernements dans tous le monde encouragent les chercheurs pour étudier, améliorer et développer des systèmes de conversion de l'énergie renouvelable (énergie solaire, énergie biomasse, hydraulique, géothermique, énergie éolienneetc.).

1.2 Définition de l'énergie

C'est une aptitude à faire des actions de convertir une forme d'énergie en une autre, ou c'est la capacité d'un système physique pour produire un travail utilisable à chauffer, mouvoir, comprimer et éclairer ...etc. [2]. En général, l'énergie est la capacité d'un système matériel de produire du travail.

1.3 Définition de l'énergie renouvelable

Les énergies renouvelables, aussi appelées les énergies propres, sont des énergies inépuisables à très long terme. Elles sont issues directement de phénomènes naturels (vent, soleil, marées...). Ces énergies ne produisent ni déchet ni gaz à effet de serre [3].

1.4 Différence entre l'énergie non renouvelable et l'énergie renouvelable

L'énergie non renouvelable est l'énergie disponible en quantité limitée, leur inconvénient majeur n'est pas en mesure de se renouveler. Les énergies non renouvelables, aussi appelées énergies fossiles sont : le pétrole, le gaz, le charbon et le nucléaire. Contrairement, une énergie renouvelable est une énergie qui est disponible en quantité illimitée (renouvellement naturel). Parmi les énergies renouvelables on peut citer : l'énergie éolienne, solaire, hydraulique, la géothermie et la biomasse.

1.5 Classement des énergies renouvelables

Nous distinguons cinq grandes familles d'énergie renouvelables :

1.5.1 Energie solaire

Ce type d'énergie est basé sur des appareils spéciaux pour transformer l'énergie de lumière de soleil en énergie d'électricité. Il y a deux types :

a) Energie solaire photovoltaïque

A l'aide d'un dispositif semi-conducteur qui transforme l'énergie lumineuse fournie par une source d'énergie inépuisable (le soleil) en énergie électrique. [4]

Le rayonnement arrivant sur la cellule solaire sera en partie réfléchi, une autre partie sera absorbée et le reste passera au travers de l'épaisseur des cellules solaires photovoltaïques [4].

Ces cellules sont des semi-conducteurs fabriqués généralement en silicium qui est capable de conduire l'électricité ou de la transporter. Les cellules PV absorbent l'énergie lumineuse et la transforment directement en courant électrique injecté dans un réseau ou stocké à partir d'une opération physique (voir fig. 1). [4]

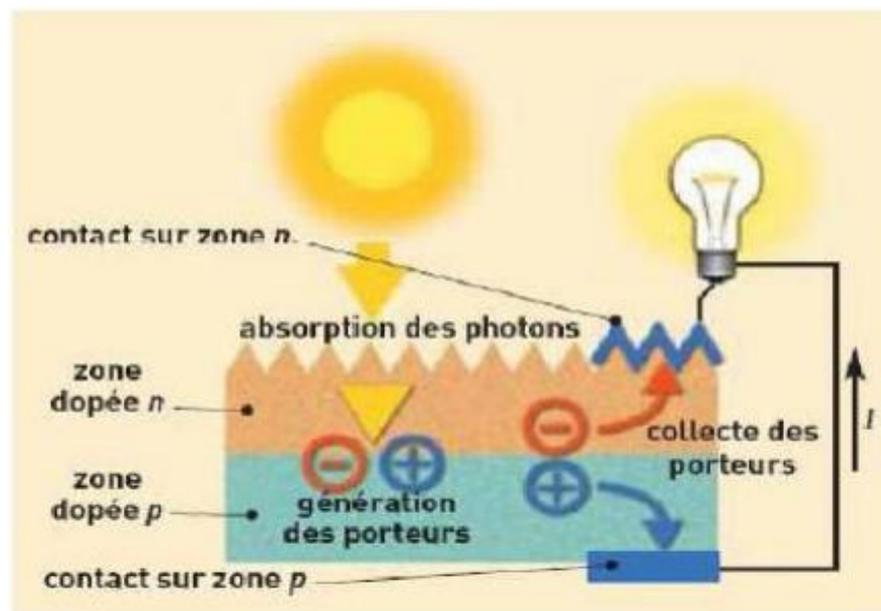


Fig. 1 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. [4]

L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé de semi-conducteurs dopés p (positif) et n (négatif), dénommé comme jonction p-n (ou n-p). Sous l'effet de ce dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de manière permanente (comme un aimant possède un champ magnétique permanent).

Quand un photon incident (grain de lumière) interagit avec les électrons du matériau, il cède son énergie à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit donc le champ électrique intrinsèque. Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la face supérieure laissant place à un trou qui migre en direction inverse. [5]

Des électrodes placées sur les faces supérieure et inférieure permettent de récolter les électrons et de leur faire réaliser un travail électrique pour rejoindre le trou de la face antérieure. [5]

b) Energie solaire thermodynamique

Les rayons solaire sont contient une quantité de chaleur très importante, le système de conversion de cette énergie est présente dans la fig. suivante :

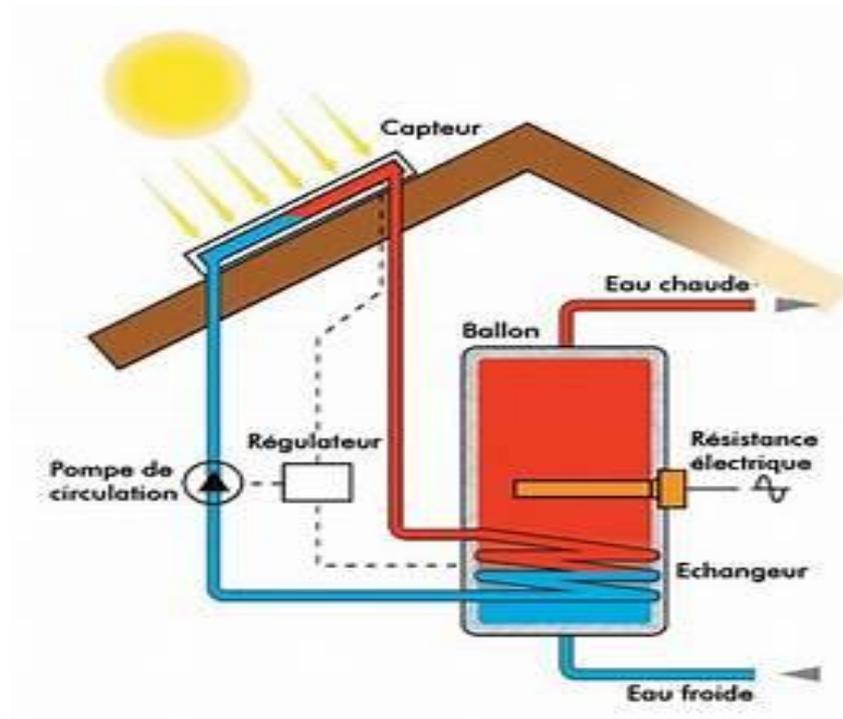


Fig. 2 : Principe de fonctionnement de conversion thermique des rayons solaires [6]

L'énergie solaire thermique est la transformation instantanée de l'énergie des rayons solaires en énergie thermique. Cette transformation peut être utilisée directement, comme le chauffage de l'eau sanitaire à l'aide des capteurs solaires, ou indirectement dans le cas de la production de l'électricité dans une centrale thermodynamique solaire.

La solaire thermique est basée sur l'utilisation de la chaleur transmise par rayonnement qui est différente de celle du photovoltaïque où l'électricité est générée par l'énergie des photons. À l'aide des progrès technologiques, les techniques de captation directe d'une partie de l'énergie solaire sont nettement améliorées afin de rendre les systèmes solaires plus fiables, efficaces et rentables. [7]

Les capteurs thermiques piègent les rayons de soleil pour les transmettre à la chaleur à partir d'un fluide caloporteur circulant précédemment dans un tuyau en cuivre. La transformation thermique par convection entre le fluide et l'eau froide met ce dernier à la température élevée pour le stocker ou le transporter vers l'utilisation directe comme eau sanitaire. [6]

1.5.2 Energie de biomasse (énergie chimique)

Dans les centrales biomasses, la combustion des biocarburants (carburant produit à partir de matériaux organiques non fossiles), des biogaz (les effluents gazeux, méthane essentiellement, issus de la fermentation de matières organiques contenues dans les décharges, les stations d'épuration...etc.) et des biomasses solide (bois) résultantes une chaleur permet de production l'électricité a partir de gagné un travail mécanique à le couple turbine/alternateur [8]. Ou bien, cette chaleur conduite vers un échangeur thermique dans le but de produire eau chaude. Le principe de conversion d'énergie de la biomasse est représenté par la fig. 3.

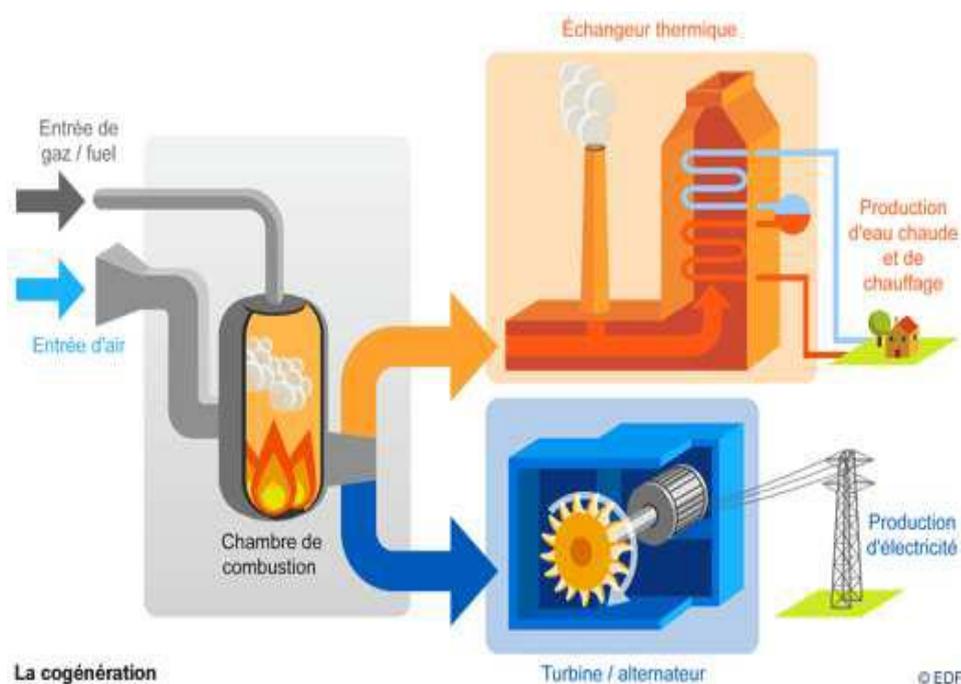


Fig. 3 : Principe de conversion énergie de la biomasse [6]

1.5.3 Energie hydraulique :

Le débit de déplacement de l'eau d'un niveau supérieur à niveau inférieur (énergie cinétique) exigé une force qui entraine une turbine hydraulique (énergie mécanique), celle-ci en contact avec un générateur de production d'électricité, la hauteur de chute d'eau et son débit sont impactées proportionnellement avec la puissance électrique développé. [8] Le principe de conversion de l'énergie hydraulique est illustré par la fig. 4.

Notons aussi, l'hydrolienne est une turbine sous-marine travaillé sur la transformation de l'énergie hydraulique (énergie de cour d'eau) à énergie mécanique qui transforme à énergie électrique à l'aide d'un alternateur.

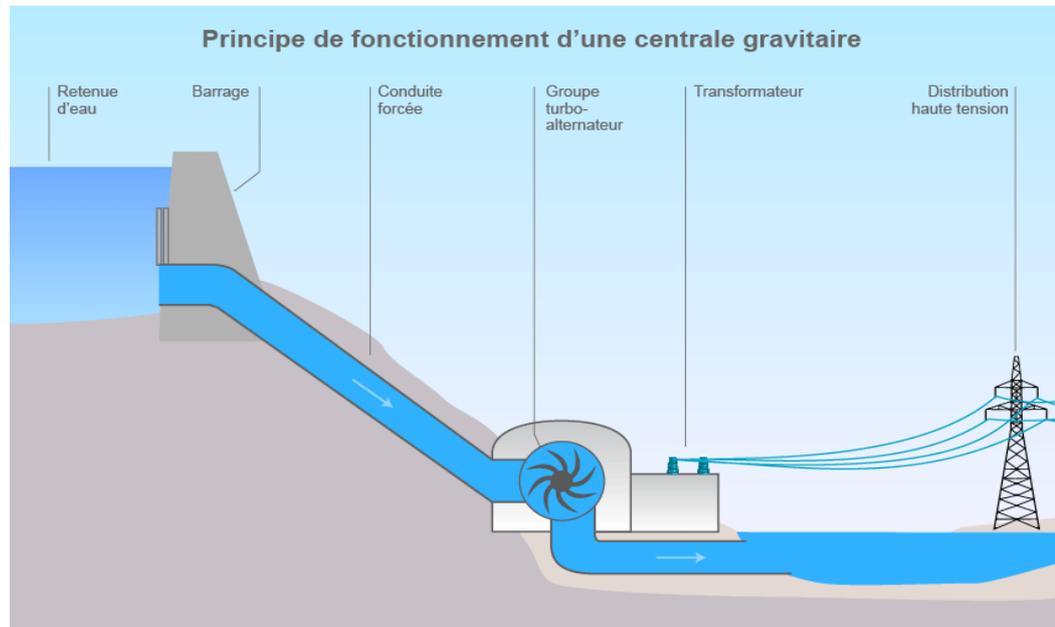


Fig. 4 : Principe de conversion de l'énergie hydraulique [8].

1.5.4 Energie géothermie :

Cette énergie produite grâce à la chaleur de la terre. Elle est contenue à l'intérieur de réservoirs souterrains de vapeur d'eau chaude et des roches chaudes, leur utilisation comme ressource générant de l'électricité, l'eau chaude ou la vapeur extraite des réservoirs géothermiques de la croûte de la terre, fait tourner les turbines électriques qui alimentent les générateurs pour produire de l'électricité. Les étapes suivantes et la fig. 5 résume le principe d'exploitation de l'énergie géothermie :

- 1- Injection d'eau froide à 5000 m de profondeur par le puits central,
- 2- Circulation d'eau dans les fractures et réchauffement au contact de la roche chaude (200°C),
- 3- Extraction de l'eau réchauffée du sous-sol par deux puits de production,
- 4- En surface, transformation par l'intermédiaire d'un échangeur thermique **a** de l'eau chaude du circuit primaire **b** en vapeur dans le circuit secondaire **c** pour entraîner une turbine **d** qui produit de l'électricité **e**. [9]

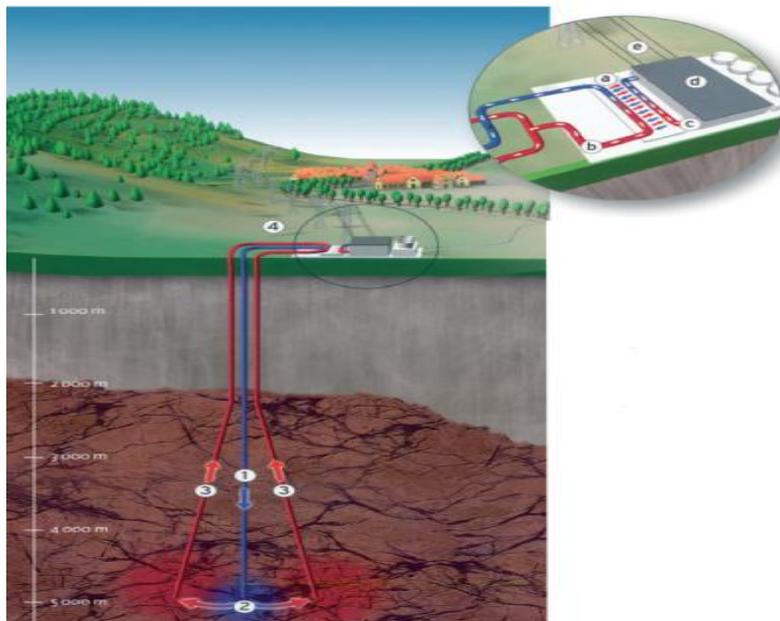


Fig. 5 : Principe d'exploitation de l'énergie géothermie [9].

1.5.5 Energie éolienne :

Sous l'effet du vent, le rotor tourne et dans la nacelle, l'arbre principal entraîne un générateur qui produit de l'électricité. La vitesse de rotation du rotor doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500 tr/mn pour une machine à 2 parties de pôles, c'est la vitesse nécessaire au bon fonctionnement du générateur. Des convertisseurs électroniques de vitesse nécessaire au bon fonctionnement du générateur [10].

Des convertisseurs électroniques de puissance ajustent la fréquence du courant produit par l'éolienne à celle du réseau électrique auquel elle est raccordée, tout en permettant au rotor de l'éolienne de tourner à vitesse variable en fonction du vent. La fig. 6 représente les étapes nécessaires de la conversion de l'énergie éolienne.

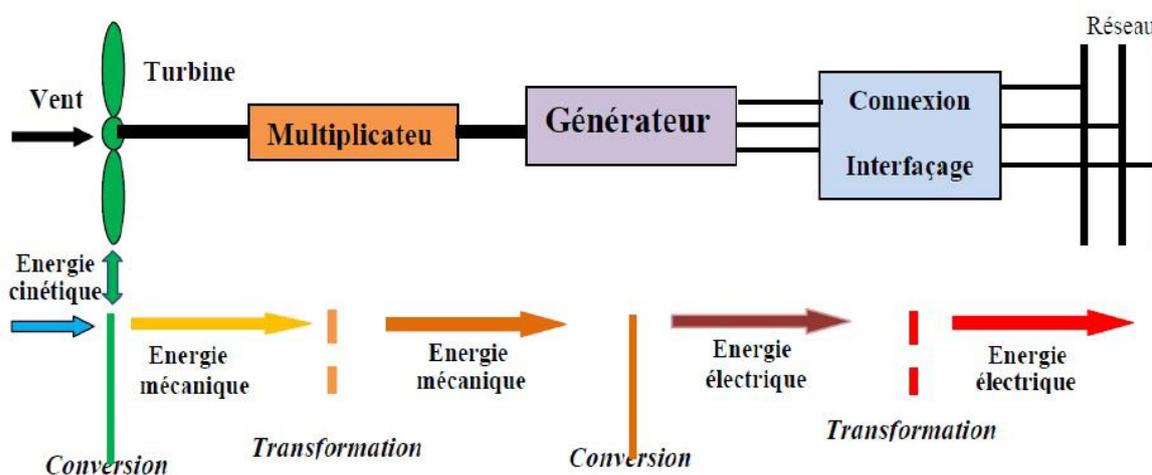


Fig. 6 : Principe de la conversion de l'énergie éolienne [10]

La tension de l'électricité produite par générateur est ensuite élevée à travers un transformateur de puissance, situé dans la nacelle ou à l'intérieur du mat. Ce niveau de tension permet de véhiculer l'électricité produite par chacune des éoliennes d'une centrale éolienne jusqu'au point de raccordement au réseau électrique public. [10]

1.6 Avantages et inconvénients des énergies renouvelables

1.6.1 Avantages

- Les sources des énergies renouvelables sont plus respectueuses de l'environnement, elles ont une meilleure répartition sur la planète, Par exemple l'énergie solaire son avantage se trouve dans le grand rendement de productions pour couvrir les besoins énergétiques en zone tempérée et l'énergie biomasse a une faible quantité des gaz toxiques a effet de serre.
- Les énergies renouvelables sont complètement gratuites, avant de prévoir les frais pour l'installation du système permettant de l'exploiter, lorsqu'est-il opérationnel les bénéfices sont développés.
- La quantité de l'eau, le vent, les rayons solaires, géothermie est toujours disponible et infinie dans l'environnement, alors les énergies renouvelables sont inépuisables.
- Sont des énergies peu polluantes, ne produisent pas beaucoup des déchets radioactifs et de CO₂. [10]

1.6.2 Inconvénients

- L'énergie renouvelable demande un coût d'installation importante et très chère pour les équipements d'exploitation des grandes performances.
- La quantité de matière peut être limitée de l'énergie biomasse à cause Exploitation intensive, celui-ci provoque sur le long terme déséquilibre écologique et déforestation important.
- Elles sont dépend a Sources incontrôlables (climat), l'énergie éolienne son performance relié a la présence du vent. [10]

1.7 Energie renouvelable dans le monde

Plus de 85% de l'énergie produite est obtenue à partir des matières fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou de l'énergie nucléaire. La fig. 7 montre la répartition en termes d'énergie primaire dans le monde pour toutes les ressources actuelles.

Les formes de production d'énergie non renouvelables engendrent une forte pollution environnementale par rejet des gaz à effet de serre [11, 12], ce dernier provoque un changement climatique irréversible ou dans le cas du nucléaire une pollution par radiations de longue durée qui pose le problème, aujourd'hui non résolu, du stockage des déchets radioactifs. [13]

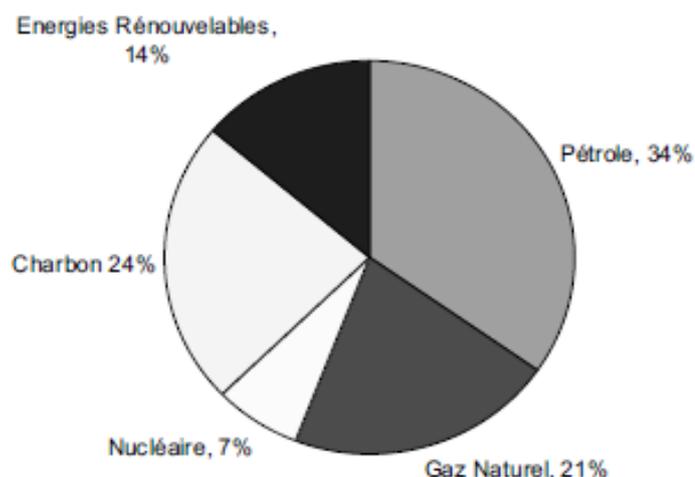


Fig. 7 : Répartition des sources primaires d'énergie dans le monde [13]

Les sources d'énergies renouvelables ont fortement augmenté pour représenter, selon les estimations, 16,7% de la consommation énergétique finale mondiale en 2010.

Durant 2011, les énergies renouvelables modernes ont continué de progresser sensiblement dans l'ensemble des secteurs de la consommation: l'électricité, le chauffage, le refroidissement et le transport. [14]

Dans le secteur électrique, les énergies renouvelables représentent près de la moitié du total estimé de la capacité électrique mondiale ajoutée durant 2011 (208 gigawatts/GW). L'énergie photovoltaïque éolienne et solaire atteint respectivement près de 40 % et 30% de la capacité des nouvelles énergies renouvelables, devant l'hydroélectricité (près de 25 %). À la fin 2011, le total de la capacité mondiale des énergies renouvelables dépassait le seuil de 1 360 GW, en hausse de 8 % par rapport à 2010. Les énergies renouvelables atteignent plus de 25% de la capacité énergétique totale mondiale (estimée à 5 360 GW en 2011), et fournissent, selon les estimations, 20,3 % de l'électricité mondiale. Les énergies renouvelables non liées à l'hydroélectricité ont dépassé le seuil de 390 GW, enregistrant une augmentation de leur capacité de 24 % durant 2010.

Le secteur du chauffage et du refroidissement offre un immense potentiel, quasiment intact, au déploiement des énergies renouvelables. Le chauffage issu de la biomasse, de l'énergie solaire et de sources géothermiques représente d'ores et déjà une part majeure de l'énergie produite par les énergies renouvelables. Ce secteur évolue lentement car les pays (en particulier ceux de l'Union européenne) commencent seulement à mettre en œuvre des stratégies d'appui public, et à assurer le suivi du chauffage issu des énergies renouvelables. Les dynamiques prévalant dans le secteur du chauffage et du refroidissement révèlent une augmentation de sa taille, l'utilisation accrue de la production combinée de chaleur et d'électricité, l'intégration des procédés de chauffage et de refroidissement renouvelables dans les réseaux des collectivités, ainsi que le recours au chauffage renouvelable à des fins industrielles. [14]

Les énergies renouvelables sont utilisées dans le secteur du transport sous la forme des biocarburants gazeux et liquides, les biocarburants liquides représentant environ 3 % du total des carburants utilisés par le transport routier dans le monde en 2011, soient plus que toute autre source d'énergie renouvelable utilisés dans le secteur du transport. L'électricité alimente les trains, les métropolitains et une part minime, mais croissante, des voitures particulières et des véhicules motorisés. Des initiatives modestes, mais en forte expansion, visent à corréliser le transport électrique et les énergies renouvelables. [14]

La croissance de l'énergie photovoltaïque solaire a été la plus rapide parmi les technologies renouvelables, durant la période s'étendant de la fin 2006 à la fin 2011, avec une capacité opérationnelle en hausse de 58 % par an en moyenne, devant l'énergie héliothermique à concentration, en augmentation de près de 37 % par an pour cette période, après un début timide, et l'énergie éolienne (26 %). La demande s'accroît également rapidement pour les systèmes de chauffage thermique solaire, les pompes à chaleur géothermiques et plusieurs carburants de biomasse solide tels que les agglomérés de bois. Le développement des biocarburants liquides a été mitigée ces dernières années car, si la production du biodiesel s'est accrue en 2011, la production d'éthanol a stagné, ou légèrement reculé par rapport à 2010. L'hydroélectricité et l'électricité géothermique progressent dans le monde, à un rythme de 2-3 % en moyenne par an. Dans plusieurs pays toutefois, leur progression, et celle d'autres technologies renouvelables, sont très avancées sur la moyenne mondiale. [14]

1.8 Energie renouvelable en Algérie

L'Algérie amorce une dynamique d'énergie verte en lançant un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables (EnR) et d'efficacité énergétique. Cette vision du gouvernement algérien s'appuie sur une stratégie axée sur la mise en valeur des ressources inépuisables comme le solaire et leur utilisation pour diversifier les sources d'énergie et préparer l'Algérie de demain. Grâce à la combinaison des initiatives et des intelligences, l'Algérie s'engage dans une nouvelle ère énergétique durable. [15]

Le programme des énergies renouvelables actualisé consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22 000 MW à l'horizon 2030 pour le marché national, avec le maintien de l'option de l'exportation comme objectif stratégique, si les conditions du marché le permettent.

Le programme d'efficacité énergétique actualisé vise à réaliser des économies d'énergies à l'horizon 2030 de l'ordre de 63 millions de TEP, pour l'ensemble des secteurs (bâtiment et éclairage public, transport, industrie) et ce, en introduisant l'éclairage performant, l'isolation thermique et les chauffe-eau solaires, les carburants propres (GPLc et GNc), et les équipements industriels performants. [15]

Le programme de l'efficacité énergétique permettra de réduire les émissions de CO₂ de 193 millions de tonnes (Tab. 1)

Tab. 1 : Récapitulatif des émissions de CO₂ à éviter à l'horizon 2030. [15]

Année	Emissions évitées (en millions de tonnes CO ₂)
2015	1,1
2020	32,1
2025	95,9
2030	193,3

L'Algérie s'engage dans une nouvelle ère énergétique durable. Le programme des énergies renouvelables dans sa version actualisée, consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22 000 MW à l'horizon 2030 pour le marché national, avec le maintien de l'option de l'exportation comme objectif stratégique, si les conditions du marché le permettent. [15]

1.8.1 Potentiel solaire

Vue de sa localisation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaire les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara).

L'énergie reçue annuellement sur une surface horizontale de 1m² soit près de 3 KWh/m² au nord et dépasse 5,6 KWh/m au Grand Sud (TAMENRASSET) (voir fig. 8).

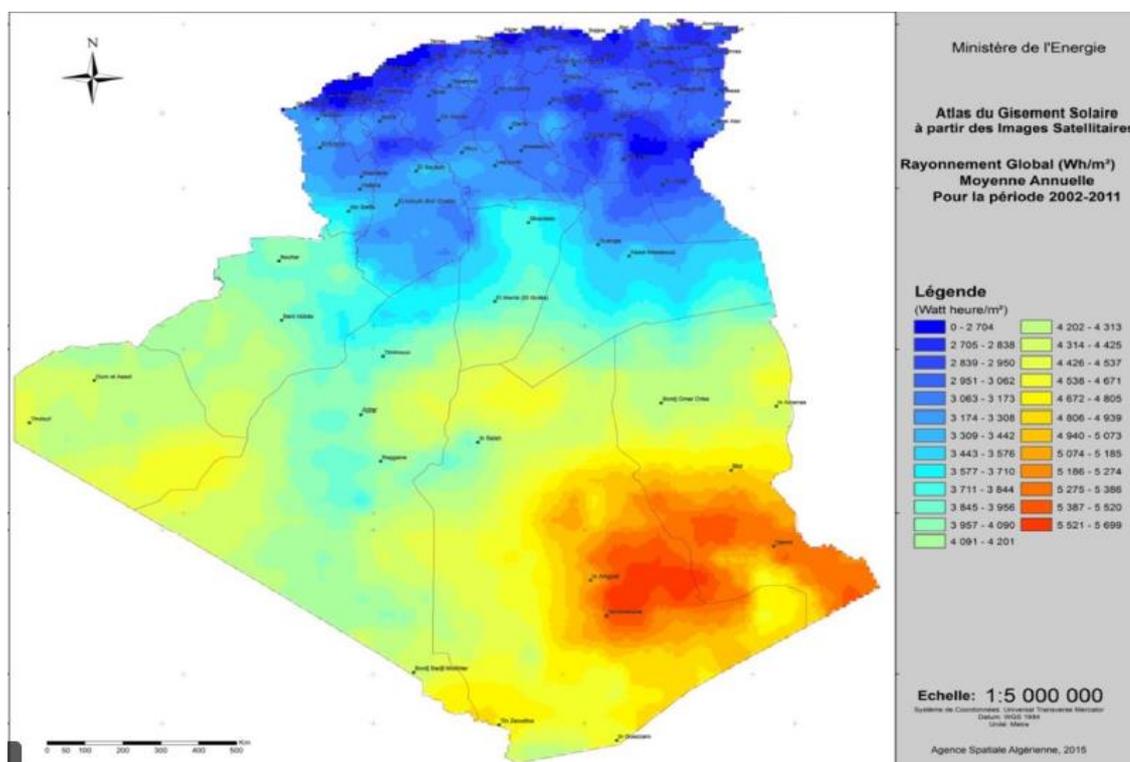


Fig. 8 : Carte de l'irradiation globale directe annuelle moyenne (période 2002-2011). [15]

1.8.2 Potentiel éolien

La ressource éolienne en Algérie varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et un climat très diversifiés. En effet, notre vaste pays, se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes. Le Nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200 Km et un relief montagneux, représenté par les deux chaînes de l'Atlas tellien et l'Atlas saharien. Entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le Sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien.

La carte représentée ci-dessous montre que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement dans le Sud-Est, avec des vitesses supérieures à 7 m/s et qui dépassent la valeur de 8 m/s dans la région de Tamanrasset (In Amguel). [15]

Concernant le Nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaïa et Annaba, sur les hauts plateaux de Tebessa, Biskra, M'sila et Elbayadh (6 à 7 m/s), et le Grand Sud (> 8m/s) (voir fig. 8).

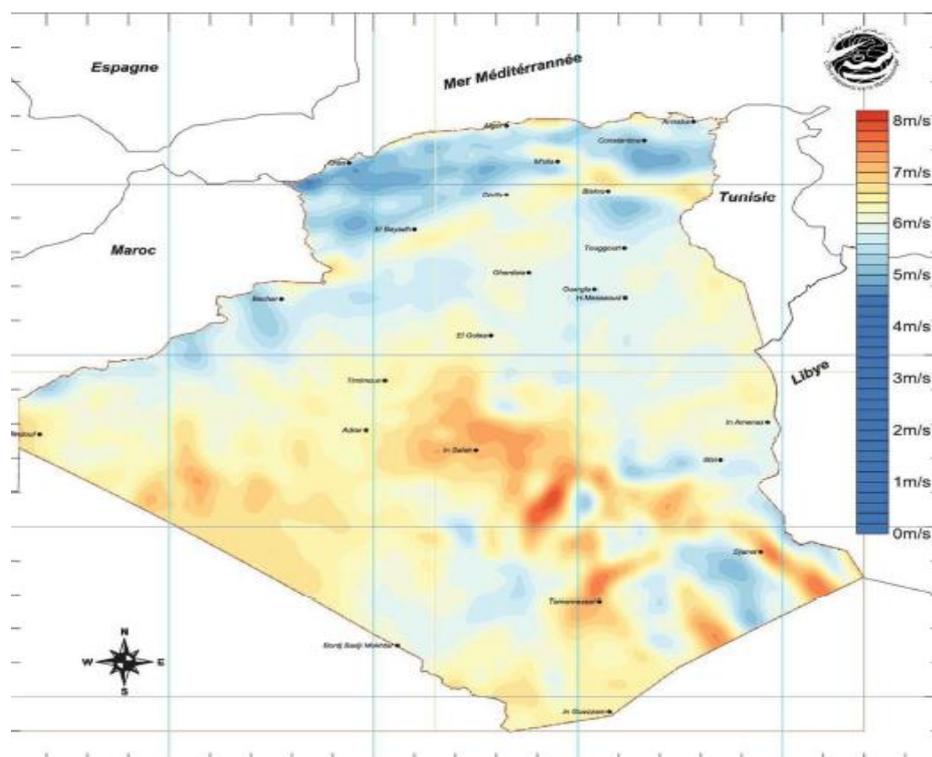


Fig. 9 : Carte du vent annuel moyen à 50 m (période 2001-2010). [15]

1.8.3 Potentiel de l'énergie géothermique

La compilation des données géologiques, géochimiques et géophysique a permis d'identifier plus de deux cent (200) sources chaudes qui ont été inventoriées dans la partie Nord du Pays.

Un tiers environ (33%) d'entre elles ont des températures supérieures à 45°C. Il existe des sources à hautes températures pouvant atteindre 118°C à Biskra.

Des études sur le gradient thermique ont permis d'identifier trois zones dont le gradient dépasse les 5°C/100m

- Zone de Relizane et Mascara
- Zone d'Aïne Boucif et Sidi Aïssa
- Zone de Guelma et Djebel El Onk. [15]

1.8.4 Potentiel hydraulique

Les quantités globales tombant sur le territoire algérien sont importantes et estimées à 65 milliards de m³, mais finalement profitent peu au pays : nombre réduit de jours de précipitation, concentration sur des espaces limités, forte évaporation, évacuation rapide vers la mer. [15]

Schématiquement, les ressources de surface décroissent du nord au sud. On évalue actuellement les ressources utiles et renouvelables de l'ordre de 25 milliards de m³, dont environ 2/3 pour les ressources en surface. 103 sites de barrages ont été recensés. Plus de 50 barrages sont actuellement en exploitation.

La consistance du programme en énergie renouvelables à réaliser pour le marché national sur la période 2015-2030 est de 22 000 MW, répartie par filière dans le Tab. 1.2 Suivant :

Tab. 2 de répartition les ER de la période 2015-2030 en Algérie. [15]

Unité : MW	1 ^{ère} phase	2 ^{ème} phase	Total
	2015-2020	2021-2030	
Photovoltaïque	3 000	10 575	13 575
Eolien	1 010	4 000	5 010
CSP	-	2 000	2 000
Cogénération	150	250	400
Biomasse	360	640	1 000
Géothermie	05	10	15
Total	4 525	17 475	22 000

CHAPITRE II : LES ÉOLIENNES

2.1 Introduction

Depuis 30 ans le vent connaît une grande importance comme source d'énergie. Cette énergie connaît une croissance de 30% par an.

Ce chapitre a pour objet d'étude de cette énergie, la description des différents types d'éoliennes, leurs caractéristiques technologiques, leurs systèmes de régulation mécanique utilisés pour avoir un meilleur rendement.

2.2 Historique

2.2.1 Pionniers de l'énergie éolienne destinée à la production d'électricité

a) Charles F. Brush (1849-1929) - USA

Charles F. Brush est l'un des fondateurs de l'industrie électrique américaine. Il inventa, entre autres, une dynamo à courant continu très efficace employée dans le réseau électrique public, la première lampe à arc commerciale, et une méthode efficace de fabrication de batteries à plomb-acide. Son entreprise, Brush Electric Company à Cleveland, Ohio, fut vendue en 1889 pour fusionner ensuite en 1891 avec Edison Electric Company sous le nom de General Electric Company (GE). Durant l'hiver de 1887-88, Brush construisit ce qui est aujourd'hui considéré comme la première éolienne à fonctionnement automatique destinée à la production d'électricité. Cette éolienne d'une puissance de 12 kW à ossature bois avait un diamètre de rotor de 17 m et 144 pales fabriquées en bois de cèdre. [16]

b) Poul La Cour (1846-1908) - DK

Le Danois Poul La Cour est considéré comme le père de toutes les éoliennes modernes destinées à la production d'électricité.

Il découvrit que les éoliennes à rotation rapide, comprenant un nombre limité de pales, étaient bien plus efficaces pour la production d'électricité que celles à rotation lente composées de nombreuses pales. Météorologue de formation, il construisit en 1891 la première éolienne destinée à la production d'électricité. Il fut l'un des pionniers de l'aérodynamisme et disposait de son propre tunnel aérodynamique. Poul La Cour a longtemps travaillé dans le domaine de l'accumulation de l'énergie et utilisait le courant produit par ses éoliennes pour produire, par électrolyse, de l'hydrogène destiné à l'éclairage au gaz de son école. En 1904, Poul La Cour a fondé la toute première société des ingénieurs en électricité éolienne du monde, qui a compté jusqu'à 356 membres. En 1918, pas moins de 120 usines électriques possédaient au Danemark une éolienne dont la puissance moyenne était alors de 20 à 35 kW. La puissance globale installée de 3 MW couvrait alors environ 3% de la consommation danoise. Ce fut également Poul la Cour qui publie la première revue du monde consacrée à l'électricité éolienne. [16]

c) Georges Darrieus - F

Ingénieur en aéronautique, il fut l'inventeur de l'éolienne à axe vertical et en breveta la conception en 1927.

La compagnie américaine FloWind fabrique l'éolienne jusqu'à sa faillite en 1997. L'éolienne de Darrius est caractérisée par ses pales de rotor en forme de C qui la font ressembler un peu à un fouet à œufs. Elle est normalement construite avec deux ou trois pales. [16]

d) Johannes Juul - DK

Johannes Juul, ingénieur électricien et ancien élève de La Cour, fut le premier à mettre au point une éolienne moderne capable de produire du courant alternatif. En 1956-1957, il conçut et construisit la plus grande éolienne du monde, la "turbine de Gedser" de 200 kW qui fonctionna pendant onze ans et devint le modèle de référence pour le développement futur de tous les autres aérogénérateurs (éoliennes équipées d'un générateur électrique).

Elle fut remise en marche trois ans durant à partir de 1977 à la demande de la NASA, dans le cadre de ses projets dans le domaine des grandes turbines électriques. [16]

2.2.2 Etapes principales

- **1930** : Des milliers de petites éoliennes sont construites dans les régions rurales des grandes plaines américaines. D'une capacité d'un à trois kilowatts, ces turbines sont installées afin d'éclairer les fermes et de recharger les batteries des radios à cristal. Les éoliennes sont par la suite utilisées pour alimenter des appareils électroménagers et de l'équipement de ferme. Les fermes canadiennes utilisent les éoliennes pour produire de l'électricité et pour pomper l'eau des puits destinée aux auges pour le bétail ; [16]
- **1940** : Avec la chute de prix du carburant fossile après la Seconde Guerre mondiale et l'électrification des régions rurales, les petites éoliennes soulèvent de moins en moins d'intérêt aux États-Unis et au Canada ; [16]
- **1960** : Des inventeurs comme Ulrich Hutter en Allemagne mettent au point des plans élaborés de turbines à axe horizontal. Ces turbines sont dotées de pales en fibre de verre et possèdent un angle d'attaque ajustable afin d'en augmenter l'efficacité ; [16]
- **1971** : Le premier parc d'éoliennes en mer débute ses activités au large du Danemark. Ce parc a une capacité de cinq mégawatts ; [16]
- **1973** : La crise pétrolière de 1973 ravive l'intérêt pour de grandes éoliennes et incite les gouvernements de l'Allemagne, de la Suède, du Canada, du Royaume-Uni et des États-Unis à financer des projets de recherche sur l'énergie renouvelable. Ces programmes sont à l'origine de la conception et de la mise en œuvre de nouveaux designs d'éoliennes qui réduisent de façon significative le coût de l'énergie éolienne au cours des deux décennies suivantes. Des parcs d'éoliennes sont construits durant les années 1970 aux États-Unis et en Europe ;
- **1980** : Le marché des éoliennes commerciales se transforme. Les petites machines de un à 25 kilowatts utilisées principalement pour l'agriculture font place à des parcs d'éoliennes capables de produire plus de 50 kilowatts et reliés au réseau électrique. En Californie, une

série de mesures réglementaires et la présence de vent dans les montagnes favorisent l'installation de 17000 éoliennes entre 1981 et 1990. Ces éoliennes peuvent produire entre 20 et 350 kilowatts. L'augmentation des coûts de l'électricité et l'abondance de vent favorisent la construction d'éoliennes en Europe ; [17]

- **1990** : Les préoccupations croissantes de la population à propos d'enjeux environnementaux comme la pollution de l'air et les changements climatiques incitent les gouvernements du Canada et d'ailleurs à s'intéresser à l'utilisation d'énergie renouvelable pour réduire les gaz à effet de serre et les autres émissions polluantes ;
- **1994** : Le parc éolien Cowley Ridge près de Pinscher Creek en Alberta est complété, devenant ainsi le premier parc éolien commercial au Canada ;
- **2001** : La capacité de production d'énergie éolienne augmente de 37 pour cent pour passer à environ 24800 mégawatts.

L'Inde augmente sa capacité de production d'énergie éolienne de 300 mégawatts pour s'établir à 1500 mégawatts. Grâce en partie à des crédits d'impôt, les États-Unis augmentent de 1700 mégawatts leur capacité de production d'énergie éolienne. Des éoliennes sont construites partout dans le pays et des projets majeurs voient le jour au Texas, au Kansas et en Oregon. L'industrie éolienne mondiale représente un chiffre d'affaires d'environ 7 milliards de dollars ; [18]

- **2002** : À la fin de 2002, la capacité de production d'énergie éolienne des États-Unis – plus de 4600 mégawatts – est concentrée dans deux États : la Californie et le Texas ;
- **2003** : À la fin de 2003, les États-Unis (avec plus de 6300 mégawatts) et l'Europe sont au premier rang en ce qui concerne le développement et l'exploitation de l'énergie éolienne. Avec plus de 28000 mégawatts, l'Europe détient maintenant 70% de la capacité éolienne mondiale. Cette performance est due en partie à des lois visant à encourager sa croissance en Allemagne, au Danemark et en Espagne.

L'Allemagne occupe le premier rang au chapitre de l'énergie éolienne avec une capacité de plus de 14000 mégawatts. L'industrie éolienne de ce pays emploie 35000 personnes et fournit 3,5% de l'électricité. C'est au Danemark que l'on retrouve la plus grande proportion d'électricité générée par le vent (plus de 20%). Les manufacturiers danois détiennent près de 40% du marché mondial des éoliennes ; [18]

▪ **Fin 2005** : La capacité mondiale d'énergie éolienne dépasse les 59000 mégawatts : son rythme de développement annuel est supérieur à 20% depuis deux ans.

Les premières éoliennes de 5 MW sont installées en Ecosse (2 en offshore), en Allemagne (1 unité). La construction de deux aérogénérateurs de 5 MW va commencer en France sur le site du Carnet 44. [16]

2.3 Energie éolienne

2.3.1 Définition

Une éolienne est un dispositif qui utilise la force du vent pour pomper l'eau ou pour produire de l'électricité comme le montre le schéma de la fig. 10.

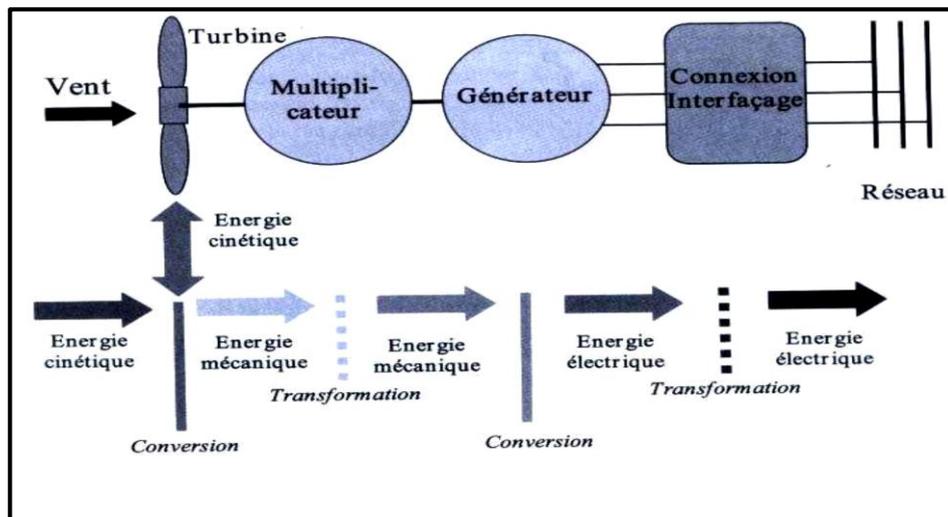


Fig. 10 : Eolienne fonctionnement. [19]

Une éolienne ou un aérogénérateur est un dispositif de transformation une partie de l'énergie cinétique de vent a énergie disponible sous un arbre de transmission puis a énergie électrique dans l'intermédiaire de génératrice. [20]

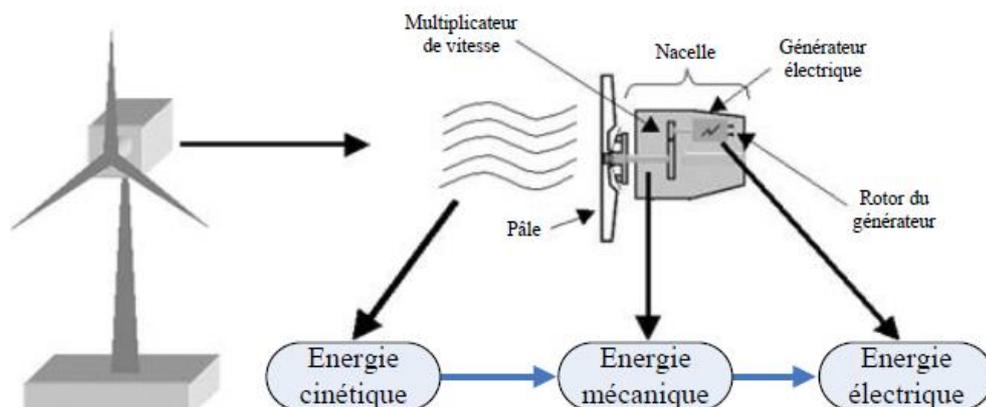


Fig. 11 : conversion d'énergie cinétique de vent dans une éolienne [20]

2.3.2 Principe de fonctionnement

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes :

- Au niveau de rotor, qui reçoit une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique ;
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique qui est transmise ensuite sur le réseau électrique. [21]

Il doit donc y avoir conversion et transmission régulières de l'énergie. Ce fonctionnement général est illustré dans la fig. suivante :

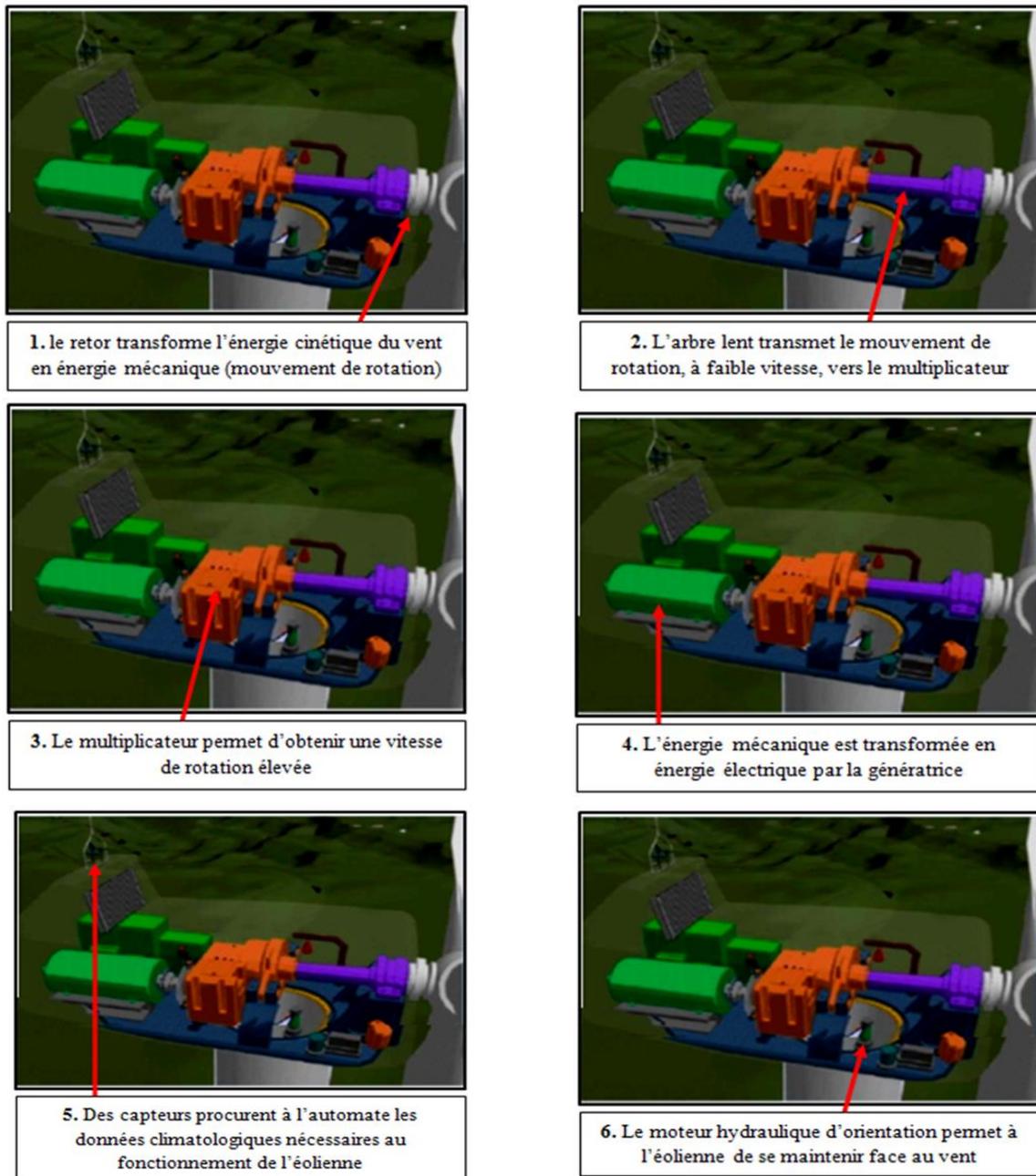


Fig. 12 : Principe de fonctionnement d'une éolienne [22]

2.3.3 Avantages et inconvénients

a) Avantages

L'énergie éolienne présente de nombreux avantages qui sont :

- Production d'une énergie indéfiniment durable et propre ;
- Ne nécessite aucun carburant ;
- Ne crée pas de gaz à effet de serre et aucun déchet toxique ;
- Une éolienne est en grande partie recyclable (gains économiques) car elle est construite en acier ;
- Après son temps de fonctionnement (environ 20 ans) elle est entièrement démontable et ne laisse aucune trace. [18]

b) Inconvénients

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolienne a quelques inconvénients, dont on cite :

- L'impact visuel, qui reste néanmoins un thème subjectif ;
- Le bruit : le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique qui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée ;
- L'impact sur les oiseaux ;
- La qualité de la puissance électrique n'est pas constante et ce de fait que la source d'énergie éolienne étant stochastique, donc la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas toujours très bonne plus stable avec la variation de la vitesse de vent) ;
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classique. [22]

2.3.4 Différents types d'éolienne

Il existe deux principaux types d'éolienne, selon la disposition de la turbine par rapport au sol on obtient une éolienne à axe vertical ou à axe horizontal.

a) Éoliennes à axe vertical

Bien après les antiques moulins perses, plusieurs familles de technologies à axe vertical ont été imaginées et réalisées, mais, aujourd'hui, elles sont plutôt marginales. La fig. 13 montre les principales technologies.

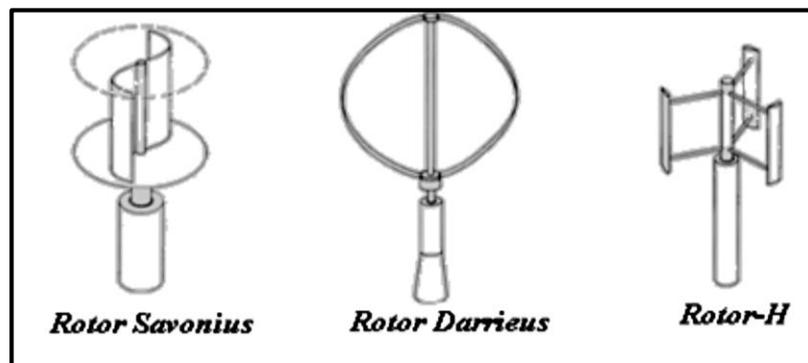


Fig. 13 : Principales technologie des éoliennes [23]

Ces éoliennes utilisent deux principes à savoir, trainée différentielle ou la variation cyclique d'incidence.

▪ **Trainée différentielle** : le principe de mise en mouvement de ce type de machine est identique à celui d'un anémomètre donc les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes comme montrée dans la fig. 14. Il en résulte donc un couple moteur, que l'on peut utiliser pour entrainer un générateur électrique ou un autre dispositif mécanique. $1 F_r$, $2 F_r$ des forces de direction et d'intensité variables créés par le vent. [24]

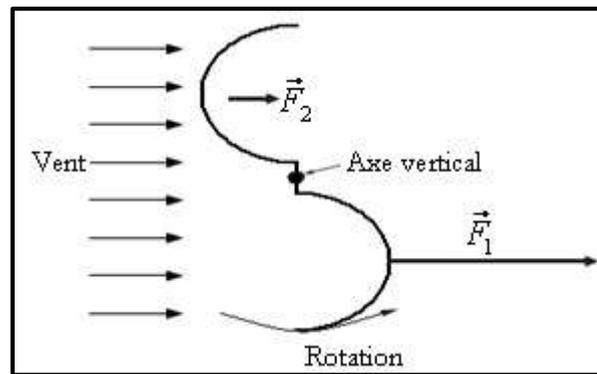


Fig. 14 : Principe de mise en mouvement (Trainée différentielle) [19]

L'utilisation la plus courante de ce type d'éoliennes est le rotor de Savonius, montre dans la fig. 15. Le fonctionnement est amélioré par rapport à l'anémomètre par la circulation de l'air rendue possible entre les deux demi-cylindres, ce qui augmente le couple moteur. On peut aisément imaginer que, lors du démarrage de ce type de machine, les cylindres soient orientés par rapport au vent de telle manière que le couple résultant soit nul. L'éolienne ne pourra donc pas démarrer spontanément. La superposition de plusieurs rotors identiques, mais décalés d'un certain angle l'un par rapport à l'autre, permet de remédier à ce problème, rendant ainsi la machine totalement autonome. [25]

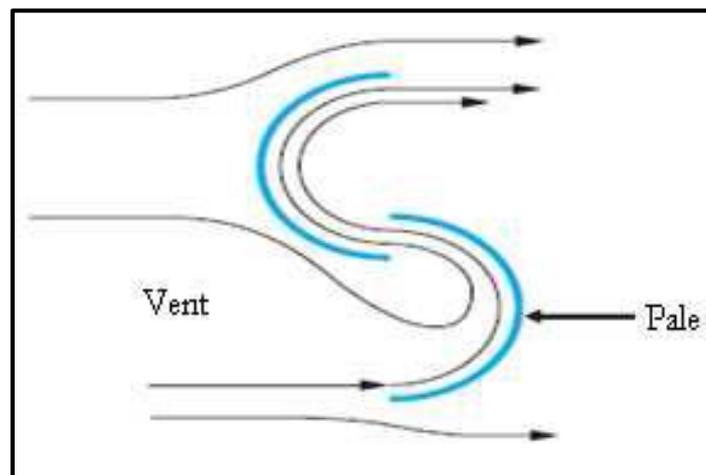


Fig. 15 : Rotor de Savonius [17]

▪ **Variation cyclique d'incidence :** dont la structure la plus répandue est celle de type Darrieus. Leur fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles fig. 16, est soumis à des forces F_r de direction et d'intensité variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un autre dispositif par exemple montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation de la génératrice en moteur. [23]

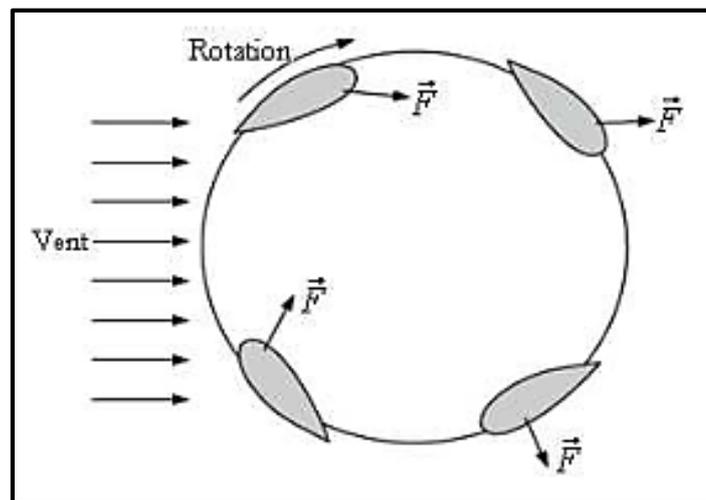


Fig. 16 : Principe de l'incidence variable [22]

b) Éoliennes à axe horizontal

La plupart des éoliennes actuellement installées utilisent des turbines à axe horizontal. Elles sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de pales profilées de façon aérodynamique à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant un dispositif mécanique tel qu'un générateur électrique. Ces machines présentent généralement un nombre de pales compris entre 1 et 3 et peuvent développer des puissances élevées. On peut distinguer les capteurs éoliens dont l'hélice est en amont par rapport au vent (hélice au vent) fig. 17.a, et ceux dont l'hélice est en aval par rapport au vent, (hélice sous le vent) fig. 17.b. [23]

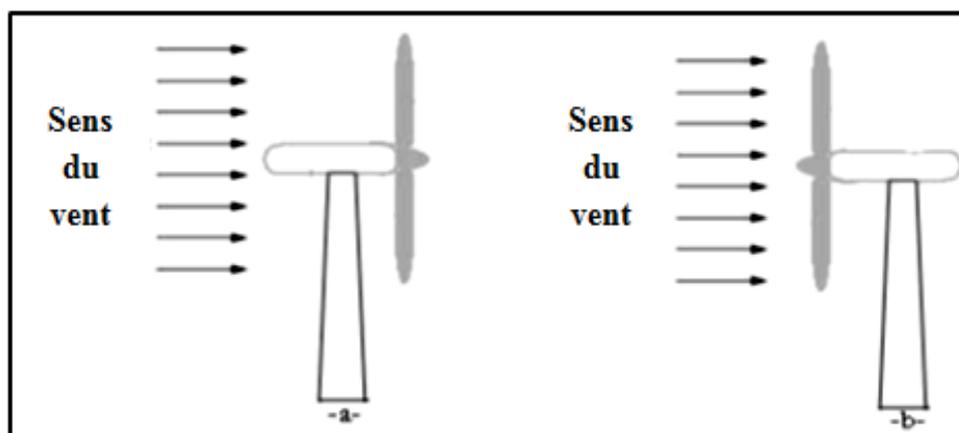


Fig. 17 : Capteur à axe horizontal (a. Éolienne aval ; éolienne amont) [21]

Dans la littérature, on classe les éoliennes à axe horizontal selon la vitesse de rotation du rotor en deux types les éoliennes à marche lentes et les éoliennes rapides.

- Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40). Leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de

puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Ces éoliennes multi-pales sont surtout adaptées aux vents de faible vitesse. Elles démarrent à vide pour des vents de l'ordre de 2 à 3 m/s et leurs couples de démarrage sont relativement forts. Cependant, elles sont moins efficaces que les éoliennes rapides et sont surtout utilisées pour le pompage d'eau.

▪ Les éoliennes rapides ont un nombre de pales assez réduit, qui varie en général entre 2 et 4 pales. Elles sont les plus utilisées dans la production d'électricité en raison de leur efficacité, de leur poids (moins lourdes comparées à une éolienne lente de même puissance) et de leur rendement élevé. Elles présentent, par contre, l'inconvénient de démarrer difficilement. Leurs vitesses de rotation sont d'autant plus grandes que le nombre de pales est faible. En 1990, une nouvelle génération moderne des éoliennes à axe horizontal placées en mer, et furent appelées les éoliennes Offshores (Fig. 18) est née. [25]



Fig. 18 : L'éolienne Offshores [23]

2.4 Constitutions d'une éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif électromécanique qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateur qui peuvent avoir des différences importantes, la fig. 19 présente les différents constituants. Néanmoins, une éolienne classique est généralement constituée de trois éléments principaux :

2.4.1 Mat

Le mat est généralement un tube en acier, son rôle est d'un part de supporter l'ensemble rotor+ nacelle pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi il permet de placer le rotor à une hauteur élevée au-dessus du sol, ou la vitesse du vent est supérieure et les effets des obstacles locaux sont moindre, améliorant ainsi le captage de l'énergie, de plus il permet d'accéder à la nacelle pour des opérations d'entretien et d'inspection .Il est fixé sur une fondation implantée dans le sol ;une lourde semelle en béton qui assure l'ancrage et la stabilité de l'éolienne .le mat peut mesurer entre 10 et 80 m de haut et ceci dépend du type d'éolienne et du site d'implantation .typiquement une éolienne de 1 MW a une hauteur de 80m de haut .ce qui correspond à la hauteur d'un immeuble de 32 étages .

Trois grandes types de tour peuvent se rencontre mat haubané. Tour en treillis et tour tubulaire. Le tour à une forme légèrement conique ou, à l'intérieur. Elles ont disposées les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, les appareillages de connexion au réseau de distribution ainsi que l'échelle d'accès à la nacelle. [23]

2.4.2 Rotor

Le rotor est un ensemble constitué des pales et de l'arbre primaire.la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu .son rôle est de capter l'énergie du vent et le transformer en énergie mécanique. Les pales doivent être légers, solide est durable, pour résister à l'action des éléments. On les construit habituellement en matériaux composites à base de fibre de verre, plastique renforcé ou en bois. Le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3 et plus le nombre de pales est grand plus le couple au démarrage sera grand et plus la vitesse de rotation sera petite .les turbines uni et bipales ont l'avantage de peser moins, mais elles produisent plus de fluctuation mécanique. Elles ont un rendement énergétique moindre, et sont plus bruyantes puisqu'elles tournent plus vite.de plus un nombre paire de pales doit être évité pour des raisons de stabilité .en effet, lorsque la pale supérieure atteint le point le plus extrême .elle capte la puissance maximale du vent. À ce moment, la pale inférieure traverse la zone abritée du vent par la tour. Cette disposition tend à faire réfléchir l'ensemble de la turbine vers l'arrière. Ceci explique pourquoi 80% des fabricants fabriquent des aérogénérateurs tripales

Les rotors à vitesse fixe sont souvent munis d'un système d'orientation des pales permettant à la génératrice de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connecté directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance .par contre pour les rotor à vitesse variables le dispositif d'orientation des pales est simplifié et une interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la charge est nécessaire. [26]

2.4.3 Nacelle

La nacelle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbre lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent

du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne. [21]

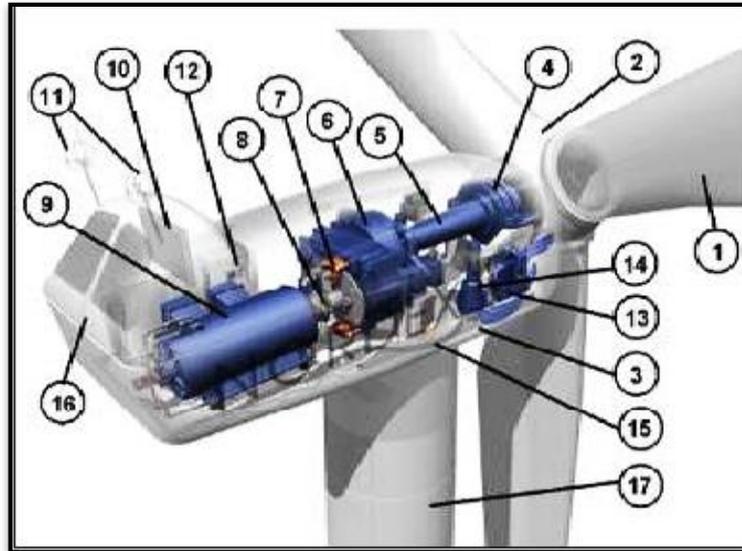


Fig. 19 : Éléments constitutifs d'une éolienne Nord ex N60 (1300 kW). [24]

Les éléments constitutifs d'une éolienne Nord ex N60 sont :

1. Pales en composite fibre de verre.
2. Moyeu du rotor en fonte.
3. Structure de la turbine en fonte ductile ou en acier soude galvanisé à chaud.
4. Paliers du rotor à double rangée de billes.
5. Arbre lent du rotor en acier haute résistance.
6. Multiplicateur de vitesse.
7. Frein à disque sur l'arbre rapide. Avec témoin d'usure.
8. Accouplement avec la génératrice de type flexible.
9. Génératrice asynchrone refroidie à l'eau.
10. Radiateur de refroidissement intégré au système multiplicateur-génératrice.
11. Système de mesure du vent (anémomètre et girouette) transmet les signaux au système de contrôle de la turbine.
12. Système de contrôle surveille et pilote la turbine.
13. Système hydraulique pour les freins d'extrémité de pale et le système d'orientation.
14. Entraînement d'orientation de la tourelle à deux trains d'engrenages planétaires entraînés par des moteurs alimentés à fréquence variable.

15. Paliers du système d'orientation équipés d'un frein à disque.
16. Capot de la nacelle en structure acier recouverte de composite fibre de verre.
17. Tour en acier tubulaire (plusieurs hauteurs possible).

2.5 Caractéristiques du vent et des turbines (loi de Betz)

La théorie globale du moteur éolien à axe horizontal a été établie par Betz. Il suppose que les pales soient placées dans un air animé à l'infini amont d'une vitesse V et à l'infini aval d'une vitesse V_1 comme présente sur la fig. 20. [26]

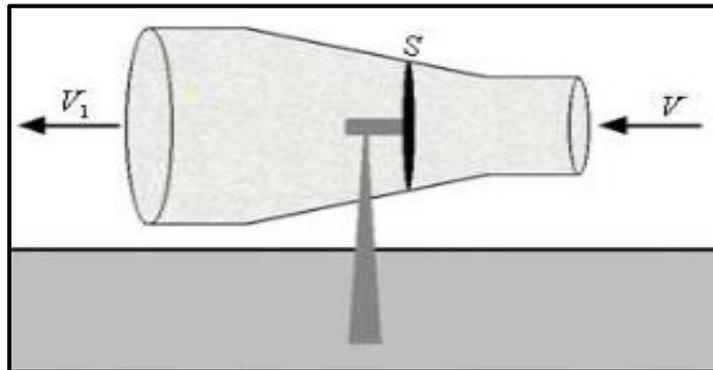


Fig. 20 : Principe de la loi de Betz.

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V et celle après passage à travers le rotor V_1 , la masse d'air en mouvement de densité volumique traversant la surface S des pales en une seconde est :

$$m = \frac{\rho S (V + V_1)}{2} \quad (2.1)$$

L'énergie éolienne provient de l'énergie cinétique du vent. En effet, si nous considérons une masse d'air m , qui se déplace avec la vitesse v , l'énergie cinétique de cette masse est :

$$Ec = \frac{1}{2} m (V^2 - V_1^2) \quad (2.2)$$

Soit en remplaçant m par son expression dans (2.2) :

$$Ec = \frac{1}{4} \rho S (V + V_1) (V^2 - V_1^2) \quad (2.3)$$

Si, pendant l'unité de temps, cette énergie pouvait être complètement récupérée à l'aide d'une hélice qui balaie une surface S , située perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent, la puissance instantanée fournie serait, alors :

$$Pv = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (2.4)$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

$$\frac{P_m}{P_v} = \frac{1}{2} \left(1 + \left(\frac{V}{V_1}\right)\right) \left(1 - \left(\frac{V}{V_1}\right)^2\right) \quad (2.5)$$

Dans la caractéristique correspondante à l'équation (2.5), on remarque que le rapport P_m / P_v , appelé coefficient de puissance C_p , présente un maximum de $16/27$ soit $0,59$ (fig. 21)

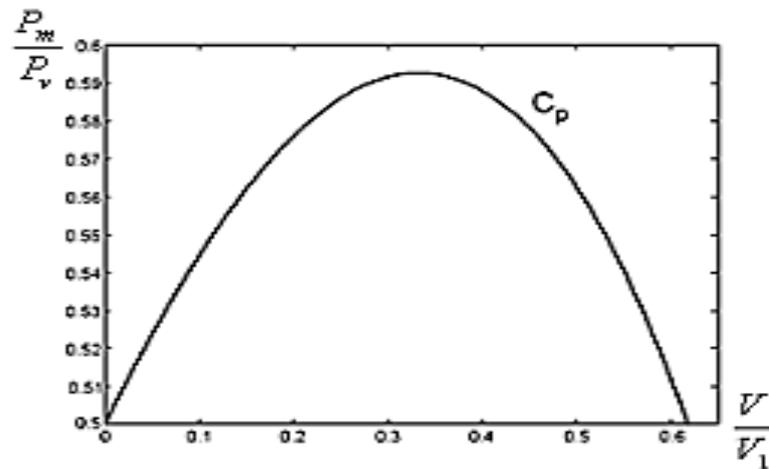


Fig. 21 : Courbe de coefficient de puissance C_p [23]

Cette limite théorique, appelée limite de Betz, fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. En pratique, cette valeur n'est jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient C_p . La valeur de C_p dépend de la vitesse de rotation de la turbine et peut s'exprimer en fonction de la vitesse spécifique λ .

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40). Leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite comme le montre la fig. précédente 2.12. Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 60 m pour des éoliennes de plusieurs MW.

Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur. De plus, leur coefficient de puissance (fig. 22) atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement au-dessous d'une vitesse de vent de 3 m/s [25].

La puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_m = C_p P_v = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V^3 \quad (2.6)$$

Avec :

$$\lambda = \frac{R \Omega}{V} \Omega = \frac{2\pi}{n} \quad (2.7)$$

Où R est le rayon de l'hélice.

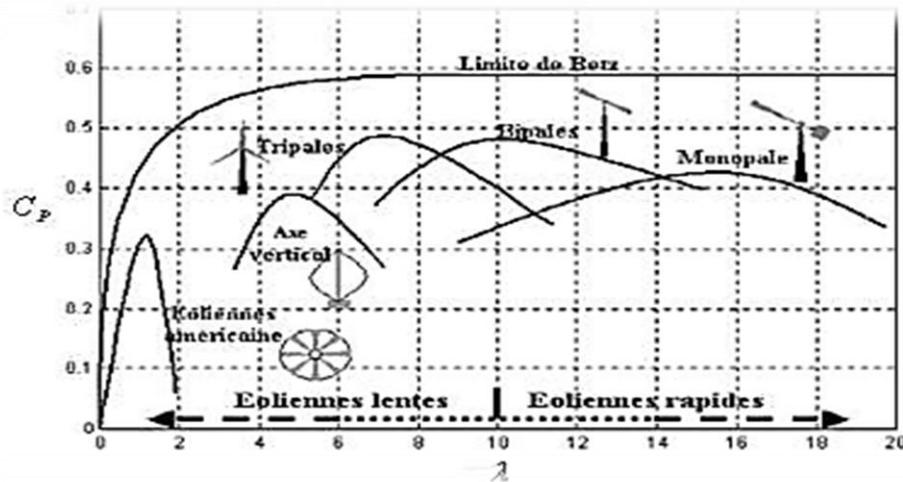


Fig.
22 :
Coefficient
de puissance
pour différen
ts types
d'éolien
nes
[25]

On peut définir la notion de rendement aérodynamique, qui est représentatif de la «Qualité Aérodynamique» de l'éolienne par le rapport :

$$\eta_a = \frac{C_p}{C_{p \max}} = \frac{C_p}{0.593} \quad (2.8)$$

2.6 Situation de l'énergie éolienne en Algérie

L'Algérie à l'instar des autres pays essaie de percer dans le domaine des énergies renouvelables et l'énergie éolienne en particulier.

Une étude préliminaire de l'évolution saisonnière et annuelle de la vitesse moyenne du vent a permis de faire une première identification des régions ventées de l'Algérie.

Cette représentation de la vitesse sous forme de carte, a deux objectifs : le premier est d'identifier les vastes régions avec de bonnes promesses d'exploitation de l'énergie éolienne. Le second est de mettre en évidence la variation relative de la ressource à travers le pays. [27]

La carte représentée dans la fig. 23 montre que le sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le nord, plus particulièrement le sud-ouest avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar.

Concernant le nord, la vitesse moyenne est globalement peu élevée. Il est noté cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaia et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et El kheiter ainsi que dans la région délimitée Bejaia au nord et Biskra au sud. Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons qui ne doit pas négliger, en particulier,

lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne. La réalisation d'une carte saisonnière a montré clairement que l'automne et l'hiver sont moins ventée. Néanmoins, il faut remarquer que la région de Tiaret fait l'exception avec une vitesse plus faible en été qu'en hiver.

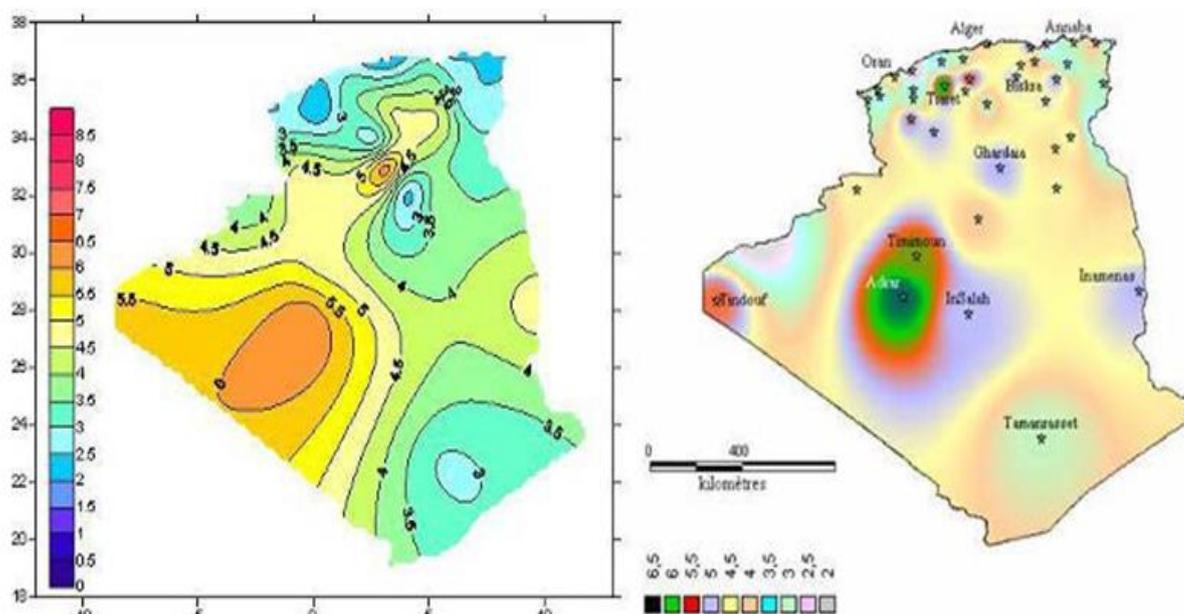


Fig. 23 : Carte du potentiel éolien en Algérie [27]

Cette carte permet de cibler les zones les mieux ventée pour installer des parcs éoliens en vue d'alimenter des régions isolées pour avoir une autonomie énergétique par rapport au réseau national déjà très chargé. Des projets de ce genre sont en phase d'étude et d'autres commence à voire le jour tel que la réalisation de la première ferme éolienne à Adrar d'une puissance de 10MW.

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné une vue d'ensemble des différentes turbines éoliennes utilisées dans l'industrie moderne pour la production d'énergie électrique. Afin d'arriver à une meilleure compréhension du fonctionnement des turbines éoliennes, partant de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par la turbine, nous avons décrit de façon explicite les différents éléments constitutifs d'une éolienne. Le prochain chapitre sera consacré à l'étude du mouvement d'une éolienne.

CHAPITRE III :

**Conception, calculs et
dimensionnements**

3.1 Introduction

La recherche dans les systèmes éoliens connaît un essor imposant depuis plusieurs années à cause que l'énergie produite est renouvelable et non polluant. Dans la chaîne de production de l'énergie électrique par l'éolienne, l'attribution de concepteur et le fabricant développent l'architecture du système et son concordance au site d'installation.

Ce chapitre est consacré pour le choix de la solution proposée dans notre étude et le choix des différentes pièces comme le moteur, le variateur de vitesse, la génératrice,...etc. Dans la deuxième partie de ce chapitre, la conception, le calcul et le dimensionnement des pièces importantes constituant le banc d'essai éolien afin d'assurer son meilleur fonctionnement a été fait.

3.2 Démarche de la conception

Afin d'avoir une meilleure avance dans notre travail, nous avons adapté une démarche structurée et ordonnée mettant en relation, d'une façon rigoureuse et sans impasse, les besoins demandé et les solutions constructives nécessaires.

En partant du besoin, nous devons choisir une démarche qui, permet:

- De mettre en évidence la fonction de service (fonction principale) pour satisfaire notre besoin.
- De mettre aussi en évidence les différentes techniques (fonction partielles) pour assurer la fonction de service
- D'avoir un cahier des charges exprimant les exigences relatives à notre machine.
- D'aboutir à la conception qui assure et garantit les solutions constructives optimales, contenu du contexte technico-économique

3.2.1 Fonction principale

La fonction principale de notre banc est conçue pour la production de l'électricité.

3.2.2 Fonctions partielles

La technique pour assurer la fonction de service est la variation de la vitesse (multiplication).

3.2.3 Cahier des charges

Notre projet est de concevoir un banc d'essais éolienne .ce dernier s'inscrit dans e cadre d'un mémoire de fin d'étude en vue l'obtention d'un diplôme de master en génie mécanique, spécialité : énergétique à l'institut des sciences et technologies de centre universitaire El-Wansharissi de Tissemsilt.

Pour cela nous devons élaborer un cahier des charges (fig. 24) constituant un document contractuel, dont le rôle est d'exprimer les exigences relatives au produit. Un document, qui ne revêt plus le caractère purement fonctionnel, décrit la spécification du besoin d'un point de vue technique, économique et opérationnel.

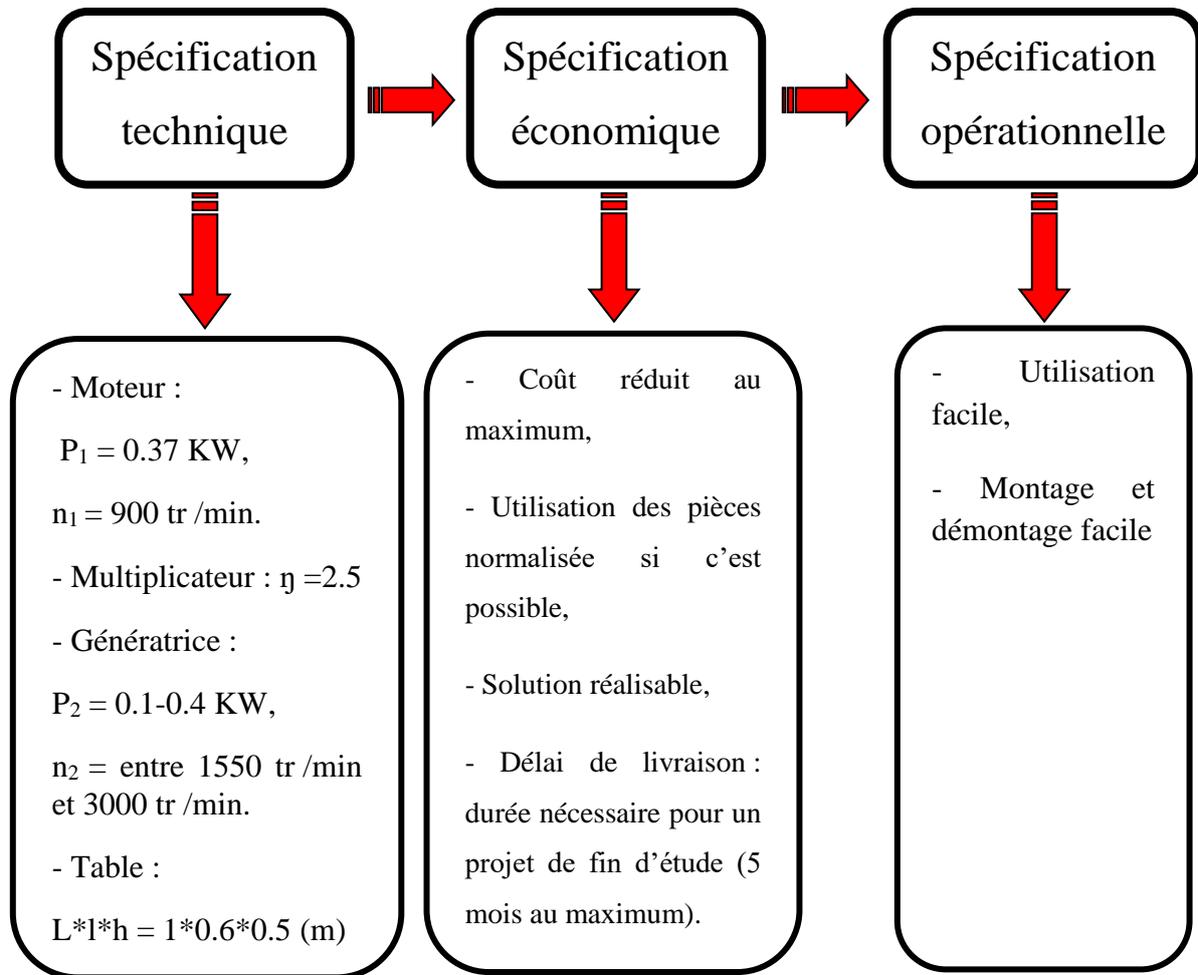


Fig. 24 : Organigramme des exigences techniques, économiques et opérationnelles.

3.3 Solutions proposées

3.3.1 Choix du banc

Aujourd'hui, il existe plusieurs types des bancs, on peut citer les différents types avec leurs avantages et inconvénients :

a) Prototype d'une éolienne

Le prototype d'une éolienne est une éolienne équipée d'un alternateur et d'une carte électronique de régulation du courant. Elle associée à différents modules externes, ce matériel permet de reproduire un système éolien de production d'électricité.

b) Banc d'essais éolien

Armoire moteur (pilotage du vent), armoire éolienne, une éolienne 24V, un moteur asynchrone triphasé 400V pour l'entraînement de l'éolienne, un variateur triphasé pour la commande du moteur et la simulation de différentes vitesses de vent (on ne s'intéresse qu'à la production d'énergie et non pas à l'étude aéroulique du système).

Tab. 3 : Comparaison des bancs éoliens.

Type du banc	Avantages	Inconvénients	Fig. du banc
Prototype d'une éolienne	<ul style="list-style-type: none"> - Similitude avec la fonctionnel, - Montage et démontage facile. 	<ul style="list-style-type: none"> - Difficulté de construire les pales, - Un ventilateur grand pour entraîner l'hélice d'éolienne. 	
Banc d'essais éolien	<ul style="list-style-type: none"> - Similitude avec la fonctionnel, - Montage et démontage facile, - Exploitation pédagogique. 	<ul style="list-style-type: none"> - Difficulté de la conception d'un multiplicateur. 	

DECISION

On a choisi le banc d'essais par rapport au prototype éolienne à raison qu'il satisfait les exigences de cahier de charge avec un changement de matériels.

3.3.2 Choix du moteur

Il existe plusieurs types des moteurs, on peut citer les différents types de moteurs avec leurs avantages et inconvénients :

Tab. 4 : Comparaison des moteurs électriques.

Type de moteur	Avantages de moteur	Inconvénients de moteur	Fig. de moteur
Moteur à courant continu	<ul style="list-style-type: none"> – Economique, – système de variation de vitesse plus simple, – Sécurité électrique. 	<ul style="list-style-type: none"> – De plus faible puissance, – moins robustes (usure de charbons). 	
Moteur à courant alternatif	<ul style="list-style-type: none"> – Puissance élevée (notamment ceux de type triphasé). 	<ul style="list-style-type: none"> – Prix élevé. 	
Moteur pas-à-pas	<ul style="list-style-type: none"> – Possibilité de pilotage par ordinateur, – sécurité électrique. 	<ul style="list-style-type: none"> – Prix élevé, puissance limitée pour un prix raisonnable. 	

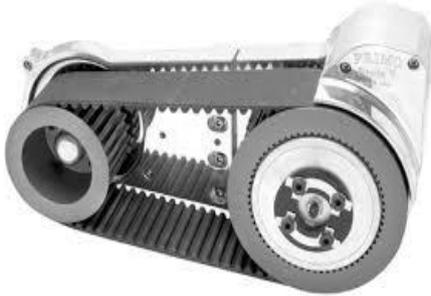
DECISION

On a choisi le moteur à courant alternatif à raison qu'il satisfait les exigences de cahier de charge.

3.3.3 Choix du variateur de vitesse (multiplicateur)

Il existe plusieurs types des variateurs de vitesse, on peut les cités dans le Tab 5. Suivant :

Tab. 5: Comparaison des variateurs de la vitesse.

Type de variateur	Avantages de type de variateur	Inconvénients	Fig. de type de variateur
Multiplicateurs de vitesse à engrenages	<ul style="list-style-type: none"> - Très résistants, - Utilisés pour des installations présentant des couples et puissances élevés, - Un rendement élevé, de l'ordre de 98%. 	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessité de lubrification. 	
Multiplicateurs de vitesse à poulies-courroies	<ul style="list-style-type: none"> - Puissance transmise : de faible à moyenne, - Transmission à grande vitesse, - Silencieuse, simple, position éloignée des arbres. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sensibilité à l'huile, - Glissement. 	

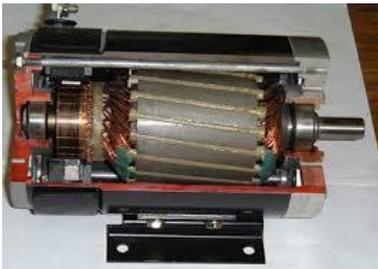
DECISION

On a choisi le multiplicateur a engrenage à raison qu'il satisfait les exigences de cahier de charge.

3.3.4 Choix de la génératrice

Le (Tab. 6) représente les deux types de la génératrice.

Tab. 6 : Comparaison de génératrices.

Type de génératrice	Avantages de type de génératrice	Inconvénients de type de génératrice	Fig. de type de génératrice
Synchrone	<ul style="list-style-type: none"> – Bon rendement, – Système de régulation du courant adapté. 	<ul style="list-style-type: none"> – Pour des centrales hydroélectriques de faible puissance, – Le coût est très élevé. 	
Asynchrone	<ul style="list-style-type: none"> – Robuste, – Le coût de construction faible, – Facilité de couplage sur le réseau, – Parfois utilisé comme génératrice dans les éoliennes. 	<ul style="list-style-type: none"> – Le rendement est plus faible que pour l'alternateur. 	

DECISION

On a choisi la génératrice asynchrone à raison qu'il satisfait les exigences de cahier de charge (Puissance < 2000 kw).

Les images ci-dessous représentent une conception de notre variateur de vitesse par le logiciel SOLIDWORKS.

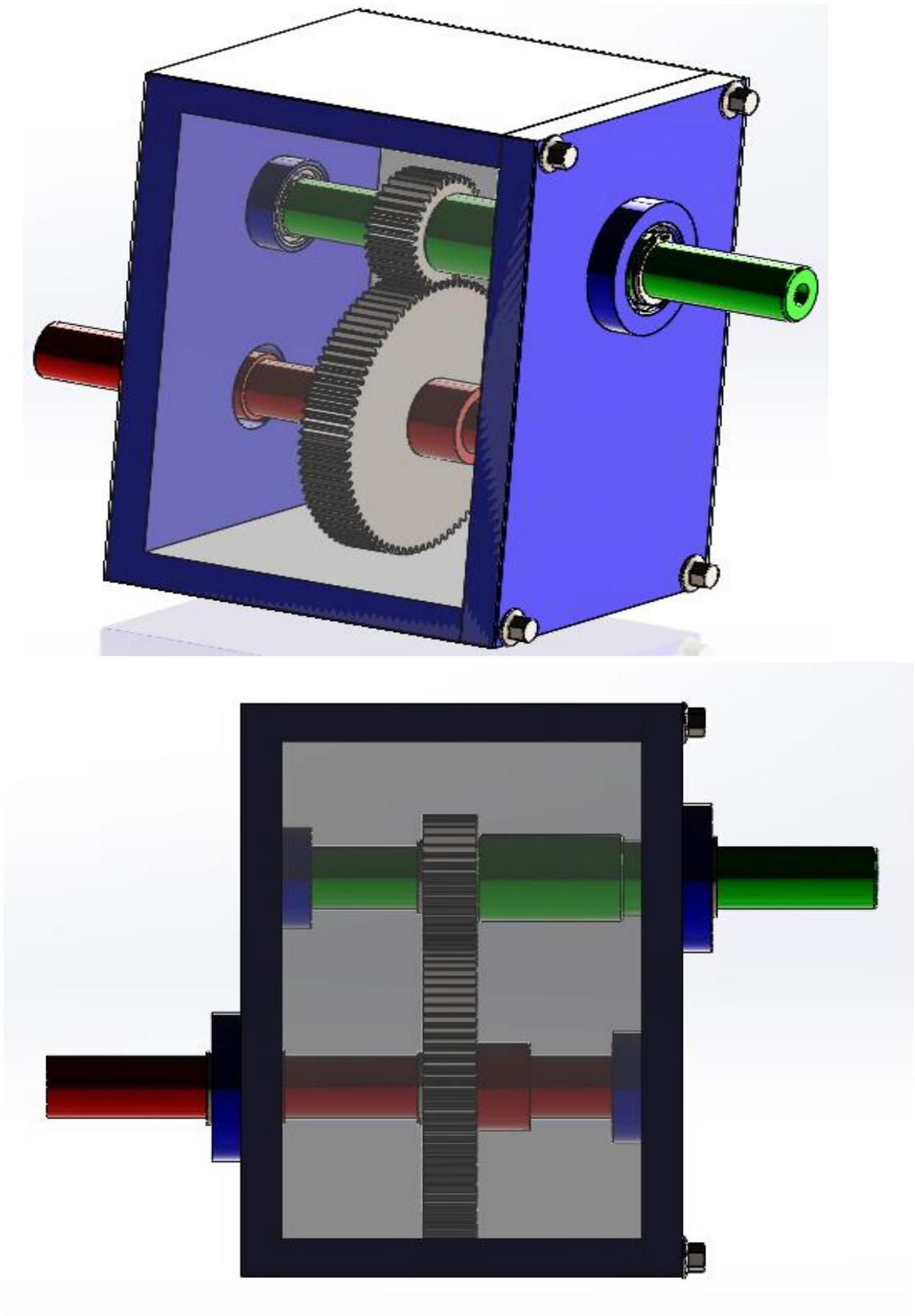


Fig. 25 : Multiplicateur réalisé par SolidWorks.

3.3.5 Schéma cinématique

a) Banc d'essai

La fig. 26 illustre le schéma cinématique du banc d'essai.

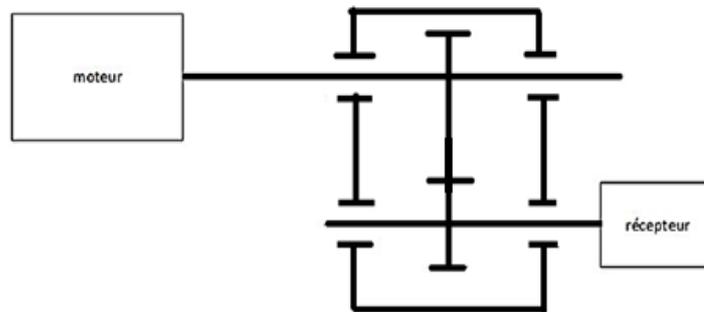


Fig. 26 : Schéma représentatif du banc d'essai.

b) Multiplicateur

La fig. 27 montre le schéma cinématique de multiplicateur.

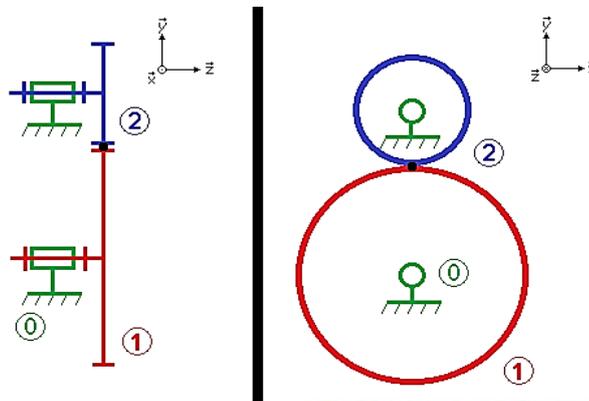


Fig. 27: Schéma représentatif du multiplicateur.

3.4 Dimensionnement

3.4.1 Dimensionnement des arbres

Les arbres du multiplicateur sont sollicités en torsion. Pour obtenir des valeurs indicatives des diamètres des arbres, on va faire leur dimensionnement préliminaire en torsion, on va travailler avec des valeurs admissibles $\tau_{t adm}$.

$$\tau_t = \frac{M_t}{R_t} \leq \tau_{t adm} \quad (3.1)$$

$$R_t = \frac{\pi d^3}{32} \quad (3.2)$$

On a :

- d : Diamètre de l'arbre ;
- M_t : Moment de torsion de l'arbre ;
- $\tau_{t adm}$: Contrainte de torsion admissible ;
- $\tau_{t adm} = \tau_t / S_t$, avec :
- τ_t : Contrainte de torsion pour le matériau ;
- S_t : Coefficient de sécurité, on prend : $S_t = 2$.

a) Dimensionnement de l'arbre (1)

La fig. 28 représente l'arbre 1.

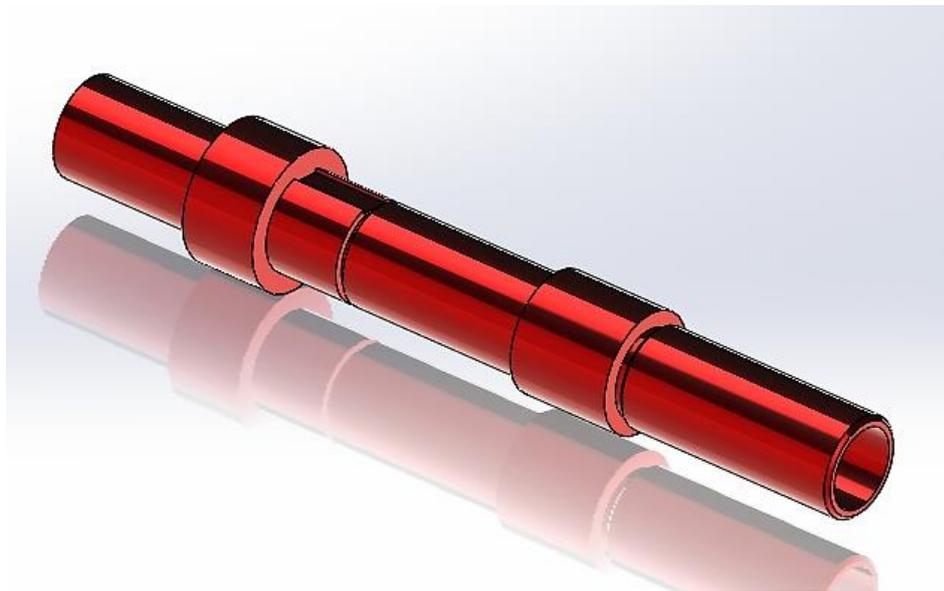


Fig. 28 : Arbre 1 réalisé par SolidWorks.

- a) Puissance transmis par l'arbre : $P_1 = 0,37$ Kw,
 b) Vitesse de rotation : $n_1 = 900$ tr/min,
 c) Moment de torsion de l'arbre :

$$M_t = 9555 \times \frac{P_1}{n_1} \quad (3.3)$$

$$M_t = 9555 \times \frac{0.37}{900}$$

$$M_t (1) = 3928 \text{ N.mm.}$$

- d) Diamètre du bout de l'arbre : (AC-60), $\tau_t = 220 \text{ N/mm}^2$

$$d_{ar1} \geq \sqrt[3]{\frac{16 \times M_t}{\pi \times \tau_{t adm}}} \quad (3.4)$$

$$d_{ar1} \geq \sqrt[3]{\frac{16 \times 2 \times M_t}{\pi \times 220}}$$

$$d_{ar1} \geq \sqrt[3]{\frac{16 \times 2 \times 3928}{\pi \times 220}}$$

$d_{ar1} \geq 8.2 \text{ mm}$, on prend : $d_{ar1} = 25 \text{ mm}$.

b) Dimensionnement de l'arbre (2)

La fig. 3.6 représente le dessin en 3D par SolidWorks de l'arbre 2.

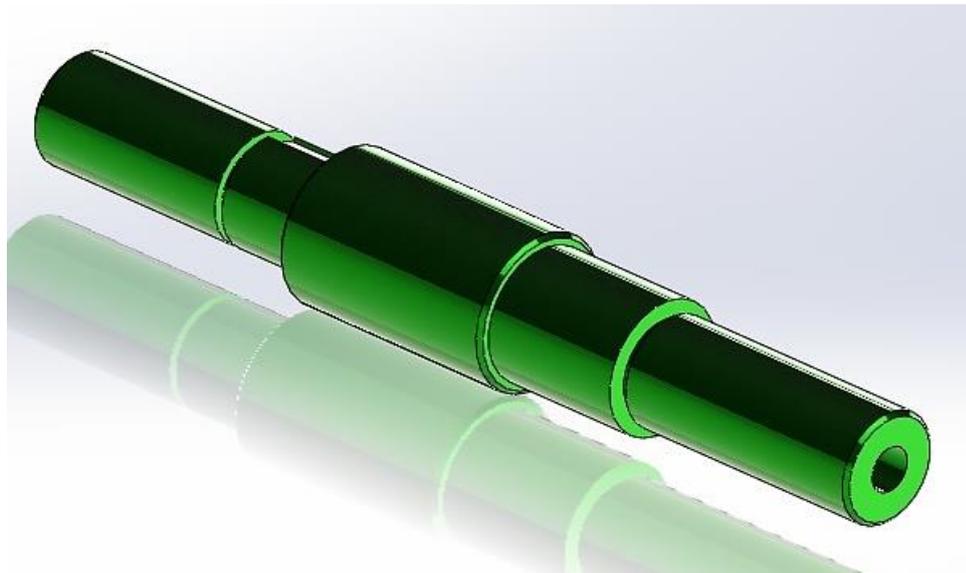


Fig. 29 : Arbre 2 en 3D réalisé par SolidWorks.

a) Puissance de l'arbre (2)

$$P_2 = \eta_{1-2} \times P_1 \quad (3.5)$$

Avec :

$$\eta_{1-2} = \eta_{roul}^4 \times \eta_{eng} \times \eta_{acc}^2 \quad (3.6)$$

Dans le Tab. 7, on indique des ordres de grandeur des rendements de quelques couples de frottement présents d'une transmission mécanique.

Tab. 7 : Rendements de quelques couples de frottement [28].

Couple de frottement	Rendement	Moyen
Engrenage cylindrique	0.960.98	0.97
Engrenage conique	0.98 0.95	0.965
Paire de roulements	0.99 0.995	0.9925

Le rendement total est : $\eta_{1-2} = 0.923$

Application :

$$P_2 = 0.923 \times 0.37 \Rightarrow P_2 = 0.34 \text{ KW}$$

b) Vitesse de rotation

$$n_2 = \frac{n_1 \times z_1}{z_2} = \frac{900 \times 80}{32} \Rightarrow n_2 = 2250 \text{ tr/min}$$

c) Moment de torsion de l'arbre

$$M_t = 9555 \times \frac{P_2}{n_2}$$

$$M_t = 9555 \times \frac{0.34}{2250}$$

$$M_t (2) = 1486.3 \text{ N.mm.}$$

d) Diamètre du bout d'arbre :(AC -60), $\tau_t = 220 \text{ N/mm}^2$ (**annexe 1**)

$$d_{ar2} \geq \sqrt[3]{\frac{16 \times M_t}{\pi \times \tau_{tadm}}}$$

$$d_{ar2} \geq \sqrt[3]{\frac{16 \times 2 \times M_t}{\pi \times 220}}$$

$$d_{ar2} \geq \sqrt[3]{\frac{16 \times 2 \times 1486.3}{\pi \times 220}}$$

$$d_{ar2} \geq 14.8 \text{ mm, on prend : } d_{ar2} = 25 \text{ mm.}$$

3.4.2 Choix et vérification des clavettes (annexe 2)

L'assemblage des roues dentées sur les arbres est réalisé d'habitude à l'aide des clavettes à faces parallèles. Elles ont le plus souvent une forme rectangulaire. Les normes NF et DIN, basés

sur ISO, prévoient plusieurs types de clavettes. Les normes retiennent les trois types suivants (fig. 3.7) :

- Clavette parallèle à bouts arrondis, forme A,
- Clavette parallèle à extrémités planes, forme B,
- Clavette parallèle avec une extrémité plane, l'autre bout étant arrondi, forme C.

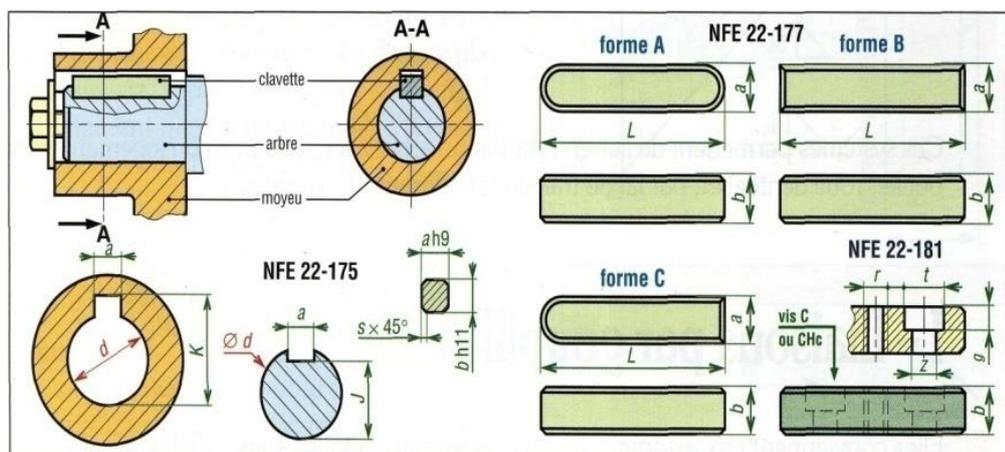


Fig. 30 : Formes des clavettes normalisés et clavetage parallèle.

Exemple de désignation :

- clavette parallèle, forme A, $b \times h \times L$ NF E 22-177,
- clavette parallèle, forme B, $14 \times 9 \times 50$ NF E 22-177.

On choisit les dimensions $b \times h \times L$ de la section de la clavette dans la norme **NF E 22-177**.

Ensuite, on va contrôler l'assemblage. [29]

La fig. 31 représente une clavette parallèle et leurs dimensions.

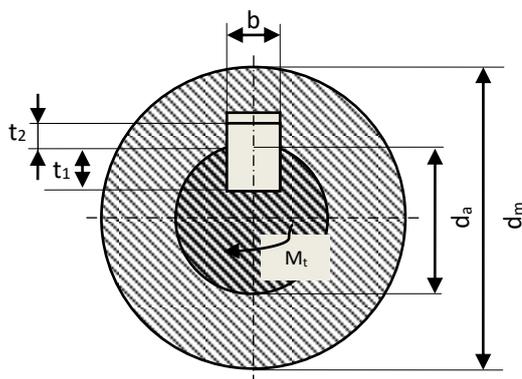


Fig. 31: Clavette parallèle et leurs dimensions.

Avec :

- l : longueur de clavette ;
- b : largeur de clavette ;
- t_1 et t_2 : hauteur de contact dans l'arbre et dans le moyeu.

a) Pression spécifique

Supposons que la pression répartie uniformément entre la clavette, l'arbre et le moyeu (hypothèse).

La pression moyenne se trouve alors par les formules :

$$P_{cl/ar} = \frac{2 \times M_t}{d_{ar} \times t_1 \times l} \leq P_{adm/cl/ar} \quad (3.7)$$

$$P_{cl/moy} = \frac{2 \times M_t}{d_{ar} \times t_2 \times l} \leq P_{adm/cl/moy} \quad (3.8)$$

Avec :

P_{adm} : Pression spécifique admissible, $P_{adm} = \frac{\sigma_f}{S_t}$

σ_f : Contrainte de flexion pour un matériau,

S_t : Coefficient de sécurité, on prend $S_t = 2$ (**annexe 3**).

Pour le matériau AC-50 : $\sigma_f = 370 \text{ N/mm}^2$, donc : $P_{adm} = 185 \text{ N/mm}^2$

b) Contrainte de cisaillement de la clavette

La section cisailée se calcul par : $A_c = b \times L_u$, et la contrainte moyenne de cisaillement est :

$$\tau_c = \frac{F_t}{A_c} = \frac{2 \times M_t}{d_{ar} \times b \times l} \leq \tau_{c adm} \dots \dots \dots (3.9)$$

$\tau_{c adm}$: Contrainte de cisaillement admissible,

$$\tau_{c adm} = \frac{2}{3} \times \sigma_{t adm}$$

$\sigma_{t adm}$: Contrainte de traction admissible,

Pour un matériau AC-60, $\sigma_{t adm} = 340 \text{ N/mm}^2$, donc : $\tau_{c adm} = 226.6 \text{ N/mm}^2$ (**annexe 1**). [30]

Application :

A. Clavette 1 :

Une clavette de type B (têtes droites), avec : $h = 8 \text{ mm}$, $b = 10 \text{ mm}$, $t_1 = 5 \text{ mm}$, $t_2 = 3.3 \text{ mm}$, et $l = 20 \text{ mm}$.

Désignation : Clavette B $8 \times 10 \times 20$ (AC-50)

1) Contrainte de pression sur l'arbre (1)

$$P_{cl/ar} = \frac{2 \times 3928}{25 \times 5 \times 20} = 3.14 \text{ N/mm}^2 \leq P_{adm}$$

La résistance est vérifiée.

2) Contrainte de pression sur le moyeu

$$P_{cl/ar} = \frac{2 \times 3928}{25 \times 3.3 \times 20} = 4.76 \text{ N/mm}^2 \leq P_{adm}$$

La résistance est vérifiée.

3) Contrainte de cisaillement

$$\tau_c = \frac{2 \times 3928}{25 \times 10 \times 20} = 15.27 \text{ N/mm}^2 \leq \tau_{c adm}$$

La résistance est vérifiée.

B. Clavette 2

Une clavette de type B (têtes droites), avec : $h = 8$ mm, $b = 10$ mm, $t_1 = 5$ mm, $t_2 = 3.3$ mm, et $l = 20$ mm.

Désignation : Clavette B 8 × 10 × 20 (AC-50)

- 1) Contrainte de pression sur l'arbre (2)

$$P_{cl/ar} = \frac{2 \times 1486.3}{25 \times 5 \times 20} = 11.8 \text{ N/mm}^2 \leq P_{adm}$$

La résistance est vérifiée.

- 2) Contrainte de pression sur le moyeu

$$P_{cl/ar} = \frac{2 \times 1486.3}{25 \times 3.3 \times 20} = 18.01 \text{ N/mm}^2 \leq P_{adm}$$

La résistance est vérifiée.

- 3) Contrainte de cisaillement

$$\tau_c = \frac{2 \times 1486.3}{25 \times 10 \times 20} = 59.45 \text{ N/mm}^2 \leq \tau_{c adm}$$

La résistance est vérifiée.

3.4.3 Éléments géométriques des roues cylindriques à denture droite

La fig. 32 représente la nomenclature d'un engrenage cylindrique.

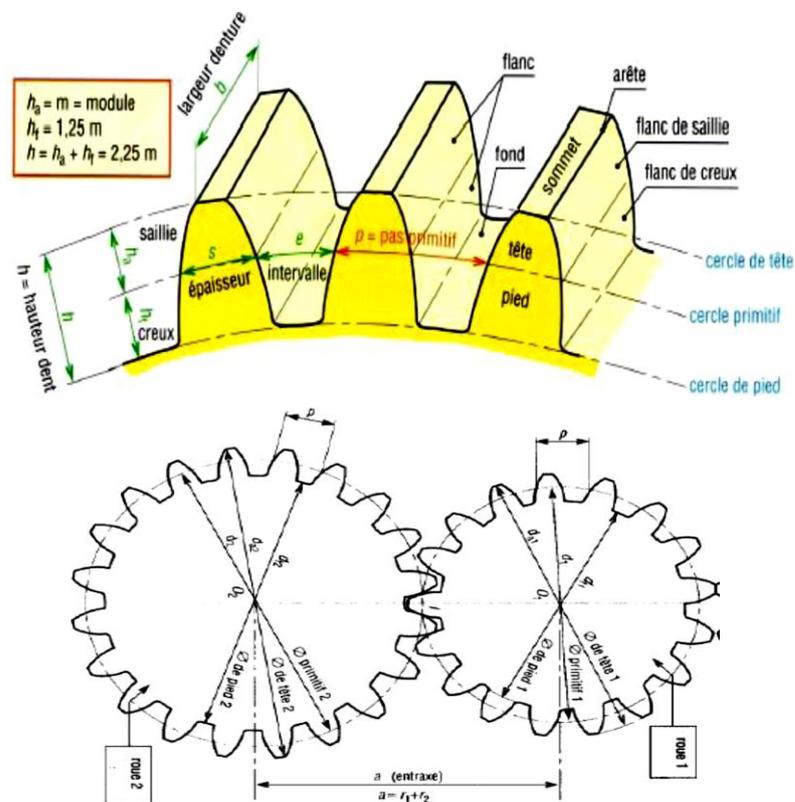


Fig. 32 : Nomenclature d'un engrenage cylindrique.

a) Dimensionnement des roues dentées

$$m \geq 2.34 \sqrt{\frac{F_t}{\sigma_f \times k}} \quad (3.10)$$

Avec :

m : module,

F_t : force tangentielle,

σ_f : Contrainte de flexion (AC-70 = 490 N.mm²),

K: Coefficient entre 8 et 10.

Application :

$$F_{t1} = \frac{2 \times M_{t1}}{d_{ar1}} = \frac{2 \times 3928}{25} \Rightarrow F_{t1} = 314.24 \text{ N}$$

$$F_{t2} = \frac{2 \times M_{t2}}{d_{ar2}} = \frac{2 \times 1486.3}{25} \Rightarrow F_{t2} = 118.9 \text{ N}$$

$$m \geq 2.34 \sqrt{\frac{314.24}{490 \times 10}} \Rightarrow m \geq 0.6$$

F_{t1} : Force tangentielle appliquée sur l'arbre **(1)**,

F_{t2} : Force tangentielle appliquée sur l'arbre **(2)**.

On prend : m normalisée égale à 1.5

Tab. 8 : Résultat et éléments géométriques des roues cylindriques à denture droite.

Désignation	Symbole	Formule		Résultat	
		Roue (Z_1)	Pignon (Z_2)	Roue	Pignon
Nombres de dents	Z (dent)	Déterminés à partir $u = (w_2/w_1) = (Z_2/Z_1)$		32	80
Pas	p	$p = m \times \pi$		4.71	
Saillie de la dent	h_a (mm)	$h_a = m$		1.5	
Creux de la dent	h_f (mm)	$h_f = 1.25 \times m$		1.87	
Hauteur de la dent	h (mm)	$H = 2.25 \times m$		3.37	
Largeur de dent	b (mm)	$b = K \times m$ avec : $K = 8$ à 10		12	
Diamètre primitif	d (mm)	$d_1 = m \times Z_1$	$d_2 = m \times Z_2$	120	48
Diamètre de têt	d_a (mm)	$d_{a1} = m (Z_1 + 2h_a)$	$d_{a2} = m (Z_2 + 2h_a)$	124.5	52.5
Diamètre de pied	d_f (mm)	$d_{f1} = m (Z_1 - 2h_f)$	$d_{f2} = m (Z_2 - 2h_f)$	114.37	42.37
Diamètre de bas	d_b (mm)	$d_{b1} = d_1 \times \cos \alpha$	$d_{b1} = d_2 \times \cos \alpha$	112.76	45.1
Entraxe	a (mm)	$a = (d_1 + d_2)/2 = m (Z_1 + Z_2)/2$		76	
Angle de pression	θ α	Généralement $\alpha = 20$			

b) Calcul des forces dans l'engrenage cylindrique à denture droites

Une force normale F_n apparaît au contact de deux dents. Celle-ci peut être décomposée en deux composantes selon deux directions orthogonales : la force tangentielle F_t et la force radiale F_r . On calcule les deux composantes sur le cercle primitif de la roue. [31]

On néglige les pertes de puissance dans les engrenages (donc les forces de frottement). Puis, on calcule les forces dues au moment de torsion (M_{t1}) (à l'arbre de la roue Z_1) qui agissent sur le pignon (Z_2).

Les relations et les résultats de calcul des forces dans un engrenage cylindrique à denture droit sont :

- Pour l'arbre (1)
 - Pour les forces tangentielles :

$$F_{t1} = F_{t1roue} = 314.35 \text{ N}$$
 - Pour les forces radiales :

$$F_{r1} = F_{r2} = F_{t1} \times \operatorname{tg} \alpha \quad (3.11)$$

$$F_{r1} = 114.41 \text{ N}$$

- Pour les forces normales :

$$F_n = \sqrt{F_{t1}^2 + F_{r1}^2} \quad (3.12)$$

$$F_n = \sqrt{314.35^2 + 114.41^2}$$

$$F_n = 334.52 \text{ N}$$

- Pour l'arbre (2)

- Pour les forces tangentielles :

$$F_{t2} = F_{t2roue} = 118.90 \text{ N}$$

- Pour les forces radiales:

$$F_{r1} = F_{r2} = F_{t2} \times \operatorname{tg} \alpha$$

$$F_{r1} = 43.27 \text{ N}$$

- Pour les forces normales :

$$F_n = \sqrt{F_{t2}^2 + F_{r2}^2}$$

$$F_n = \sqrt{118.9^2 + 43.27^2}$$

$$F_n = 126.52 \text{ N}$$

c) Vérification de la résistance de la denture des roues dentées

La vérification de la sollicitation se fait au pied de la dent puisque l'effort unitaire maximal apparaît au pied de la dent. Il est dû à une flexion variable cycliquement dans le temps. Après un nombre de cycles de sollicitation, une rupture par fatigue peut se produire au pied de la dent. La vérification de la sollicitation au pied de la dent est faite en calculant l'effort unitaire dû à la flexion σ_f et en comparant à une valeur admissible $\sigma_{f \text{ adm}}$. [32]

$$\sigma_f = \frac{F_t}{b \times m} \times Y_f \times K_V \times K_\alpha \times K_{f\beta} \leq \sigma_{f \text{ adm}} = \frac{F_{f \text{ lim}}}{S_f} \times K_{fN} \times Y_s \times Y_{fx} \quad (3.13)$$

Où:

- σ_f : l'effort unitaire de flexion au pied de la dent,
- F_t : la force tangentielle au niveau du cercle primitif,
- b : la largeur de la roue,
- m : le module (**mm** 'engrenage conique' et **m** 'engrenage cylindrique'),
- Y_f : le facteur de forme de la dent. Il est choisi à en fonction du nombre de dents pour $x = 0$,
- K_A : facteur de charge dynamique extérieur,

- K_v : facteur dynamique intérieur qui dépend de la vitesse périphérique sur le cercle primitif

$$V = \frac{\pi \times d_1 \times n_{\text{pignon}}}{60000} \text{ [m/s]} \quad (3.14)$$

Où d_1 est le diamètre primitif du pignon en **mm** et n est la vitesse de rotation de l'arbre du pignon en **tr/min**.

- $K_{f\beta}$: facteur de la distribution longitudinale de la charge pour la sollicitation au pied de la dent.
 - K_{α} : facteur de la répartition frontale de la charge,
 - S_f : facteur de sécurité pour la sollicitation au pied de la dent (**annexe 3**),
 - K_{fN} : facteur de nombre de cycles de sollicitation au pied de la dent,
 - Y_s : facteur de concentration des contraintes,
 - Y_{fx} : facteur dimensionnel. [32]
- Cas des engrenages cylindriques à denture droit

- Roue (Z_1)

$$\sigma_f = \frac{314.35}{12 \times 1.5} \times 2.45 \times 1.1 \times 1.2$$

$$\sigma_f = 58.5 \text{ N. mm}^2 \leq \sigma_{f \text{ adm}}$$

- Pignon (Z_2)

$$\sigma_f = \frac{314.35}{12 \times 1.5} \times 3.15 \times 1.1 \times 1.2$$

$$\sigma_f = 121.15 \text{ N. mm}^2 \leq \sigma_{f \text{ adm}}$$

3.4.4 Dimensionnement des roulements de l'arbre

Les roulements sont utilisés pour guider l'arbre en rotation et soumettent à une force radiale, afin de guider cet arbre on a utilisé :

- Des roulements de type BC,
SKF61805 (d: 25, D: 37, B: 7)
SKF61806 (d: 30, D: 42 B: 7)
- Vitesse de rotation ($n = \text{cts}$),
- Durée de vie désirée est 20000 heures.

Le contrôle se fait par la vérification des conditions suivantes (**annexe 4**):

$$C_{\text{rou}} > C_{\text{néc}} \quad ; \quad L_{\text{hrou}} > L_{\text{hnéc}}$$

Avec:

C : la capacité de charge dynamique,

L_h : Durée de vie.

a) Contrôle des roulements de l'arbre (1)

La roue est soumise à une force radiale F_r et une Charge dynamique $C = N$.

La charge dynamique de base des roulements est donnée par la relation suivante :

$$C = \frac{f_L \times f_Z \times P}{f_t \times f_n \times f_H} \quad (3.15)$$

Avec :

- f_L : Coefficient de durée de vie,
- f_Z : Coefficient supplémentaire des efforts dynamique,
- f_t : Coefficient de température,
- f_n : Coefficient de nombre de tours,
- f_H : Coefficient de dureté.

On a:

- $f_Z = f_t = f_H = 1$
- $f_n = \sqrt[3]{\frac{100}{3 \times n}}$ [32] Avec : n le nombre de tours min^{-1}
- $P_2 = 0.37 \text{ N}$
- $n_1 = 900 \text{ tr/min}$
- $f_n = \sqrt[3]{\frac{100}{3 \times 900}} \Rightarrow f_n = 0.15$
- $f_L = \sqrt[3]{\frac{L_h}{500}}$ [32] Avec L_h : durée de vie en heures
- $f_L = \sqrt[3]{\frac{20000}{500}} \Rightarrow f_L = 3.41$
- $P_2 = Fr_1 = 114.41 \text{ N}$

$$C = \frac{f_L \times f_Z \times P}{f_t \times f_n \times f_H} = \frac{3.14 \times 1 \times 114.41}{1 \times 0.15 \times 1} \Rightarrow C = 2950.9 \text{ N}$$

Vérification de la durée de vie

$$L_h = \left(\frac{C}{P}\right)^3 \times \frac{10^6}{60 \times n} \quad (3.16)$$

$$L_h = \left(\frac{2950.9}{114.41}\right)^3 \times \frac{10^6}{60 \times 900} \Rightarrow L_h = 21756.7 \text{ heures}$$

On trouve : $L_h = 21756.7$ heures, la durée de vie du roulement choisie est supérieure aux 20000 heures désirées.

b) Contrôle des roulements de l'arbre (2)

- $f_n = \sqrt[3]{\frac{100}{3 \cdot n}}$ [32] Avec : n le nombre de tours min^{-1}
- $P_2 = 0.34 \text{ N}$
- $n_2 = 2250 \text{ tr/min}$
- $f_n = \sqrt[3]{\frac{100}{3 \times 900}} \Rightarrow f_n = 0.15$

On a :

- $f_L = \sqrt[3]{\frac{L_h}{500}}$ [32] Avec L_h : durée de vie en heures
- $f_L = \sqrt[3]{\frac{20000}{500}} \Rightarrow f_L = 3.41$
- $P_2 = F_r = 43.27 \text{ N}$

$$C = \frac{f_L \times f_z \times P}{f_t \times f_n \times f_H} = \frac{3.14 \times 1 \times 43.27}{1 \times 0.15 \times 1} \Rightarrow C = 980.9 \text{ N}$$

Vérification de la durée de vie

$$L_h = \left(\frac{C}{P}\right)^3 \times \frac{10^6}{60 \times n}$$

$$L_h = \left(\frac{2950.9}{43.27}\right)^3 \times \frac{10^6}{60 \times 900} \Rightarrow L_h = 20517.42 \text{ heures}$$

On trouve : $L_h = 20517.42$ heures, la durée de vie du roulement choisie est supérieure aux 20000 heures désirées.

3.5 Conclusion

Ce chapitre constitue une phase inévitable pour le dimensionnement de notre banc. En premier lieu, nous avons fait le dimensionnement et le choix du type de motorisation, On a vérifié la résistance des principaux éléments de notre banc (multiplicateur).

Conclusion générale

Dans le présent manuscrit, nous avons présenté une conception complète d'un banc d'essai éolien pédagogique.

Dans un premier temps, on a donné des généralités sur les différentes familles des énergies renouvelables, ainsi que un aperçu historique de l'énergie éolienne destinée à la production d'électricité suivi par des généralités sur les éoliennes (différentes types d'éolienne, constitutions d'une éolienne,...etc.).

Ensuite, nous avons établi une méthodologie d'une conception détaillée d'un banc d'essai à partir d'un cahier des charges bien spécifié et le dimensionnement des différents éléments fonctionnels constituant ce dernier pour garantir le meilleur fonctionnement.

Dans cette étude, la conception et les mises en plan de pièces constituant le banc (le multiplicateur de vitesse) ont été faites par le logiciel de CAO (SOLID WORKS). Ce dernier est un outil de conception qui permet de construire virtuellement et rapidement un objet en trois dimensions (3D).

L'étude de ce projet m'a permis d'approfondir mes connaissances dans le domaine de la mécanique en générale, et qui il ma aider à maitriser quelques points dans ma formation et qu'ils sont :

- La méthodologie de conception des pièces mécaniques.
- L'outil informatique et beaucoup plus le logiciel SOLIDWORKS.
- La rédaction d'un rapport de recherche de fin d'étude.

Finalement ce travail a atteint les objectifs fixés au départ dans le cahier des charges et comme perspective on espère que cette étude sera suivie d'un réalisation et développement afin de bénéficier des avantages multiples qu'offre ce type de banc en pédagogie.

Référence :

- [1] https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/directions_services/politique-etenjeux/innovation/tc2015/technologies-cles-2015-energie.pdf
- [2] P. Olivier : GEP 306 La politique : L'art de la persuasion. Cours de l'université de Sherbrooke, 2000.
- [3] <http://www.mediachimie.org/ressource/les-%C3%A9nergies-renouvelables-de-la-pr%C3%A9histoire-%C3%A0-nos-jours>
- [4] A. Laugier, J. A. Roger : Les Photopiles solaires du matériau au dispositif, du dispositif aux applications. Technique & documentation, Paris, 1981.
- [5] Le photovoltaïque – module 3 – fonctionnement et technologie. institut bruxellois pour la gestion de l'environnement, 2010.
- [6] A. AGRION : Module énergie renouvelable. capgemini consulting, 2013.
- [7] A. HAMIDAT : Le solaire thermique en Algérie, Bulletin des Énergies Renouvelables, Centre de Développement des Énergies Renouvelables, 2012.
- [8] : O. Amna : Analyse de la transition vers les énergies renouvelables en Tunisie : Risques, enjeux et stratégies à adopter. Thèse doctorat, Université de Sfax et de docteur de l'Université côte d'azur Discipline Sciences économiques, 2016.
- [9] http://www.enr.fr/userfiles/files/Kit%20de%20communication/2010104945_SERGothermie20100607LD.pdf.
- [10] Kh. Lotfi, M. Lakhdar : Etude et Simulation d'une éolienne à base d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée. Thèse master, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA, juin 2017.
- [11] <http://www.effet-de-serre.gouv.fr>
- [12] Efficacité Energétique : Panorama Mondial – Synopsis. Conseil Mondial de l'Energie. ADEME.
- [13] Agence Nationale Pour la Gestion des Déchets Radioactifs. <http://www.andra.fr/>
- [14] Rapport mondial REN21 sur les énergies renouvelables : carte interactive et rapport mondiale sur l'avenir des énergies renouvelables-page 5.
- [15] <http://www.energy.gov.dz/francais/uploads/2016/Energie/energie-renouvelable.pdf>
- [16] A. HAMIDAT : Le solaire thermique en Algérie, Bulletin des Énergies Renouvelables, Centre de Développement des Énergies Renouvelables, N° 22, 2012.
- [17] <http://tpe-si-2011.e-monsite.com/pages/l-energie-eolienne/histoire.html>

- [18] F. Poitiers : Etude et commande des génératrices asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne : machine asynchrone a cage autonome et machine asynchrone a double alimentation relie au réseau. Thèse de doctorat, école polytechnique de Nantes, France, 2003.
- [19] T. Philippe, Th. Claude : Etude d'une éolienne. Projet technologique université de Québec, TCH-090-095, 2007.
- [20] <http://www.explorateur-energie.com>, Avril 2019.
- [21] B. OUAHIBA : Analyse des performances d'éoliennes sur un Banc d'essai, simulation sous ANSYS et SolidWorks. Mémoire de master, Université M'hamed Bougara de Boumerdès, 2017.
- [22] Z. Salah Eddine : Modélisation et étude d'un système d'énergie éolienne relié au réseau. Mémoire de master, UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR- ANNABA 2017.
- [23] A. Mirecki. : Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance. Thèse Doctorat, institut national polytechnique de Toulouse, France, 2005.
- [24] <http://www.windpower.org/fr/core.htrn>
- [25] L. Khelfat, L. Maataoui : Etude et Simulation d'une éolienne à base d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée. Mémoire de master, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA, juin 2017.
- [26] R. Bonnefille : Les réalisations d'Electricité de France concernant l'énergie éolienne. Direction des Etudes et Recherches Electricité de France, LA HOUILLE BLANCHE / N° 1 – 1975.
- [27] V. Courtesuisse : Supervision d'une centrale multi sources à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique. Thèse de doctorat en génie électrique, Ecole nationale d'Arts en métiers, 2008.
- [28] R. Borzec : Réducteurs de vitesse à engrenages. Technique de l'ingénieur, BM5640, 2007.
- [29] G. Nicolet : Eléments de machines. Edition Speslausanne, Paris, L.F1955 877-1020, 343 pages, 1971.
- [30] A. Keskes : Fiches d'instruction, Mécanique. Université Ferhat Abbas de Sétif 1, 2001.
- [31] M. Barreau : Calculez vos engrenages, La longévité ISO et les cotes de vos engrenages sans ordinateur. Edition Lavoisier, Paris, 1982.
- [32] A. Chevalier, J. Bohan : Guide de dessinateur industriel. Edition Hachette Technique, 1985.

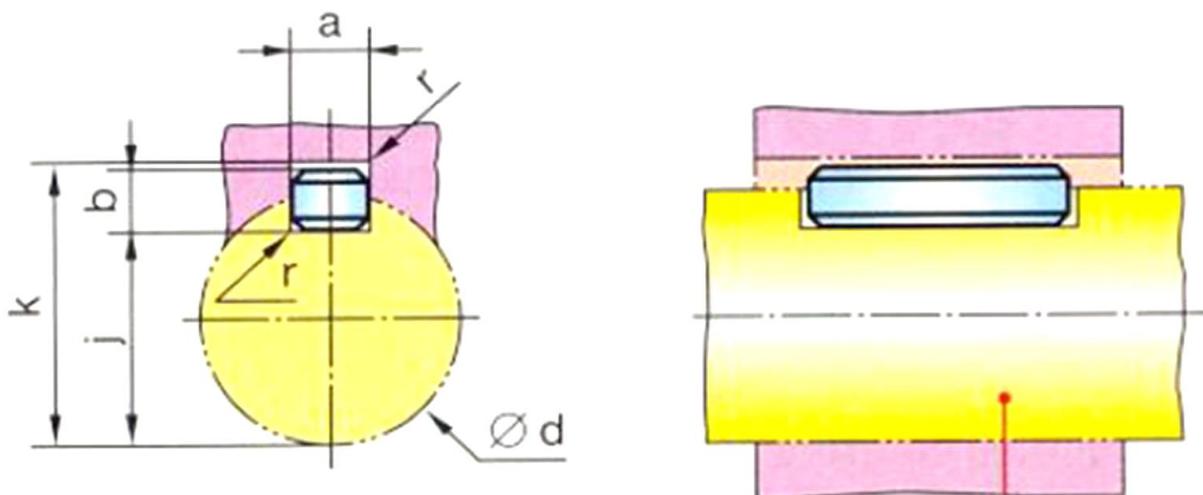
Annexes :

Annexe 1 : Matériaux de construction

Matériaux de construction												
groupe de matériaux	désignation de matériaux	masse spécifique g/cm ³	résistances d'endurance en N/mm ²									
			charge statique (I)				charge oscillatoire					
			$\sigma_{t,R}$	$\sigma_{t,F}$	$\sigma_{t,F}$	$\tau_{t,F}$	$\sigma_{t,II}$	$\sigma_{t,III}$	$\sigma_{t,II}$	$\sigma_{t,III}$	$\tau_{t,II}$	$\tau_{t,III}$
aciers de construction	Ac 34-2	7,85	340	220	240	130	190	120	240	160	130	90
	Ac 37-2		370	240	260	150	210	130	260	180	150	100
	Ac 42-2		420	260	300	160	240	140	300	200	160	120
	Ac 50-2		500	300	370	190	300	180	370	240	190	140
	Ac 60-2		600	340	430	220	340	200	430	280	220	160
	Ac 70-2		700	370	490	260	370	230	490	320	260	190
aciers d'armelation	CK 22	7,85	500	310	420	200	310	210	390	260	200	150
	CK 35		600	370	500	250	370	230	440	290	250	170
	CK 45		650	400	530	270	400	250	490	320	270	180
	15CrMo4		800	550	630	270	520	310	590	380	270	210
	34CrMo4		900	650	750	390	590	360	680	440	390	250
	42CrMo4		1000	800	900	450	640	440	740	480	450	230
	30CrMoV9		1250	1050	1100	480	760	450	880	560	480	340
aciers de cémentation	CK 10	7,85	420	250	350	180	250	200	350	250	180	170
	CK 15		500	300	420	200	300	200	380	250	200	170
	16MnCr5		800	600	750	360	500	300	600	400	360	250
aciers à ressorts	18CrNi8	7,85	1200	800	1100	470	760	450	860	550	470	330
	50SiMn7		1300	1100			630	420		600	350	
	50CrV4		1350	1200			630	420		620	360	
aciers coulés	62SiCr5	7,85	1400	1200			720	480		680	400	
	Ac clE - 40		400	200			190	130		160	100	
	Ac clE - 50		500	250			250	170		200	120	
fonte grise à graphite lamellaire sphéroïdal	Ac clE - 60	7,85	600	320			310	210		220	140	
	FGS 40		400	280			170	110		160	100	
	FGS 50		500	350			220	150		210	130	
	FGS 60	600	420			270	180		260	150		
	Ft 20	7,20	200	—		80	60		80	70		
	Ft 25	7,20	250	—		90	60		100	90		
alliages des métaux non ferreux	Ft 30	7,20	300	—		110	70		120	110		
	M-CuSi3Zn5	8,50	300	100					120			
	M-CuAl10F+3Mn3	7,50	450	150					230			
	M-AlMg3	2,70	210	130					60	40		
	M-AlSi6Cu	2,70	220	180					70	50		
	AlMg3	2,70	200	120		80	60	90	70	50		
	CuZn40Po2	8,40	510	430								
CuZn37	8,40	620	500									
CuZn29Al	8,40	450	250									
CuZn40Al; Fe1	8,10	600	250									
plastique	polyamid -	1,13	60									
	intradid - H	1,13	70									
	polyester renforcé par fibres de verre	2,10	600									

Les résistances à cisaillement suivent des résistances à traction σ_t selon la formule approchée $\tau_c \approx \frac{2}{3} \sigma_t$

Annexe 2 : Clavettes parallèles



d	a	b	s	j	k	d	a	b	s	j	k
de 6 à 8 inclus	2	2	0,16	$d - 1,2$	$d + 1$	58 à 65	18	11	0,6	$d - 7$	$d + 4,4$
8 à 10	3	3	0,16	$d - 1,8$	$d + 1,4$	65 à 75	20	12	0,6	$d - 7,5$	$d + 4,9$
10 à 12	4	4	0,16	$d - 2,5$	$d + 1,8$	75 à 85	22	14	1	$d - 9$	$d + 5,4$
12 à 17	5	5	0,25	$d - 3$	$d + 2,3$	85 à 95	25	14	1	$d - 9$	$d + 5,4$
17 à 22	6	6	0,25	$d - 3,5$	$d + 2,8$	95 à 110	28	16	1	$d - 10$	$d + 6,4$
22 à 30	8	7	0,25	$d - 4$	$d + 3,3$	110 à 130	32	18	1	$d - 11$	$d + 7,4$
30 à 38	10	8	0,4	$d - 5$	$d + 3,3$	130 à 150	36	20	1,6	$d - 12$	$d + 8,4$
38 à 44	12	8	0,4	$d - 5$	$d + 3,3$	150 à 170	40	22	1,6	$d - 13$	$d + 9,4$
44 à 50	14	9	0,4	$d - 5,5$	$d + 3,8$	170 à 200	45	25	1,6	$d - 15$	$d + 10,4$
50 à 58	16	10	0,6	$d - 6$	$d + 4,3$	200 à 230	50	28	1,6	$d - 17$	$d + 11,4$

Nota : L'emploi d'une clavette, sur un arbre de dimension supérieure, est possible.

Annexe 3 : Contraintes, coefficient de sécurité et facteur de forme

Contraintes existantes : $\sigma_{ex} (\tau_{ex})$

cause des efforts par choc, précontrainte de courroies, de balourd, de traction magnétique ou de vibration, les contraintes existantes s'augmentent par rapport aux contraintes nominales données sur fiche 1 : $\sigma_{ex} = f_F \cdot \sigma$
 $\tau_{ex} = f_F \cdot \tau$ avec $f_F \geq 1$

Condition de fonctionnement	f_F	Condition de fonctionnement	f_F
Machines en régime sans choc, véhicules sur rails suspendus à ressorts	1 ... 1,2	Suspensions chargées par chocs, moteurs électriques, moteurs de propulsion, courroies en tissu	2 ... 3
Machines à piston équilibrées, roues droites à dents meulées, fraisées ou rabotées, véhicules outiers à bondage pneumatique.	1,2 ... 1,5	Transmission par courroies trapézoïdales, roues droites à dents non entaillées, véhicules sur rails non suspendues	1,5 ... 2
Courroies en cuir ou en caoutchouc	3 ... 4		

Coefficient de sécurité S et contraintes admissibles

Contraintes normales et tangentielles (pour éléments lisses)	Pression spécifique sur surfaces
$\tau_{adm} (\tau_{adm}) = \sigma_F (\tau_F) / S$ ($S = 1,5 \dots 3$)	$P_{adm} = \sigma_{Fsp} / S_F$ ($S_F = 1,5 \dots 2$ pour matériaux ductiles)
$\tau_{ex} = \sigma_F / \sigma_{ex} (\tau_F / \tau_{ex}) > 1$	$P_{adm} = \sigma_{Rsp} / S_R$ ($S_R = 3 \dots 4$ pour matériaux fragiles)

Coefficient de sécurité nécessaire S_F pour l'endurance

h_b : nombre d'effort maximal en % ; $h_b = 100\%$: effort sans choc
 τ_m et σ_s : contrainte moyenne et contrainte supérieure d'une charge alternée

Graph showing safety factor S_F vs stress ratio $\frac{\sigma_m}{\sigma_s}$ for $h_b = 100\%$. The y-axis ranges from 1,0 to 3,0. The x-axis ranges from 0,5 to 1,0. Curves are labeled with values: 2,8, 2,6, 2,4, 2,2, 1,3, 1,6, 1,7, 1,6, 1,5.

Graph showing safety factor S_F vs h_b for $\frac{\sigma_m}{\sigma_s} = 0 \dots 0,5$ and $\frac{\sigma_m}{\sigma_s} = 0,5 \dots 1,0$. The y-axis ranges from 1 to 3. The x-axis ranges from 20 to 100%. Curves are labeled with values: 1,1, 1,2, 1,3, 1,4, 1,4, 1,5, 1,6, 1,7, 1,8, 1,9, 2,0, 2,1, 2,2, 2,3, 2,4, 2,5, 2,6, 2,7, 2,8, 2,9, 3,0.

Charge statique	$\sigma_{adm} (\tau_{adm}) = b_1 \cdot b_2 \cdot \sigma_F (\tau_F) / \alpha_k \cdot S_F$ $S_{ex} = b_1 \cdot b_2 \cdot \sigma_F (\tau_F) / \alpha_k \cdot \sigma_{ex} (\tau_{ex})$	Charge dynamique	$\sigma_{adm} (\tau_{adm}) = b_1 \cdot b_2 \cdot \sigma_F (\tau_F) / \alpha_k \cdot S$ $S_{ex} = b_1 \cdot b_2 \cdot \sigma_F (\tau_F) / \alpha_k \cdot \sigma_{ex} (\tau_{ex})$
-----------------	---	------------------	---

Pour flexion

Example values for flexion: $u/r = 4$, $a/r = 28$, $\alpha_{kf} = 2,7$. The nomogram shows curves for different values of α_{kf} (1,9 to 2,9) and a/r (5 to 35). A diagram shows a shaft with a fillet transition.

Pour Torsion

Example values for torsion: $t/r = 0,7$, $\frac{a}{r} = 2,7$. The nomogram shows curves for different values of α_{kt} (1,3 to 2,3) and a/r (5 to 35). A diagram shows a shaft with a fillet transition.

Annexe 4 : Calcul des roulements

Durée de vie de roulements L_h en 1000h	coefficient de dureté f_H					coefficient de température f_t	
	HRC	HB	HV	f_H	temp. °C	f_t	
moteur d'avion	0,5... 1,0						
moteur de voiture	1,0... 2,0	64	720	800	1	≤100 1,0	
appareils électroménagers	1,0... 2,0	60	655	695	1	120 0,97	
boîte de vitesse d'automobile	1,5... 4,0	58	615	655	0,90	140 0,92	
grandscamions, bus	2,0... 5,0	56	575	615	0,80	160 0,87	
petits ventilateurs	2,0... 4,0	53	525	560	0,66	180 0,81	
petits moteurs électriques <4kW	8,0... 10	47	445	470	0,44	200 0,75	
moteurs électriques moyens	10... 15	45	420	445	0,37	220 0,69	
réducteurs de vitesse	10... 15	42	390	410	0,31	240 0,62	
petits appareils de levage	5,0... 10	40	370	390	0,27	260 0,54	
machines à mouler plastiques	10... 20	37	345	365	0,23		
machines-outils	20	36	335	355	0,22		

Détermination de la charge équivalente dynamique

$P = V \cdot X \cdot F_r + Y \cdot F_a$ pour roulements à une ou deux rangées de billes, à rotule sur rouleaux ou billes, à rouleaux coniques

$P = F_r \cdot V$ pour roulements à une ou deux rangées de rouleaux cylindriques, à aiguilles

$P = F_a$ pour butées à billes à simple ou double effet

F_r - charge radiale réelle X - facteur radial V - facteur de rotation
 F_a - charge axiale réelle Y - facteur axial

facteur de rotation V	mode de la charge	roulements	V
	bague intérieure tournante par rapport à la charge	tous roulements	1,0
	bague intérieure immobile par rapport à la charge	roulements à une rangée de billes, roulements à rouleaux, butées à rouleaux sur rotule	1,2
		roulements à billes à contact oblique roulements à rotule sur deux rangées de billes	1,0

Université de Sétif
 L.G.N.P. - 3000/2001

ELEMENTS DE MACHINES - TECHNIQUE - L.M.D.

Annexe 5 : Dessins

Résumé :

L'énergie éolienne est la plus économique puisque le vent est gratuit et son développement est en forte croissance comme source d'énergie propre. Une éolienne est un dispositif qui utilise la force du vent pour produire de l'électricité.

Dans le présent manuscrit, nous proposons de faire l'étude, la conception complète et le dimensionnement d'un banc d'essai qui donne l'image mécanique d'une petite éolienne. Sur laquelle nous pouvons étudier les méthodes de la maintenance préventive conditionnelle.

Mots clé : énergie, énergie renouvelables, éolienne, banc d'essai.