



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Centre universitaire d'El-Oued
Département de génie électrique

Mémoire de fin d'étude
En vue de l'obtention du diplôme D'ingénieur d'Etat en Electrotechnique
Option : Réseaux électriques

THEME

**GENERATION DE L'ENERGIE ELECTRIQUE PAR UNE
EOLIENNE**



Proposé et dirigé par :
E .Merazzega

Réalisé par :
Bellaroussi Ahmed
Ahmed Salah Ammar
Sedira Amara

Juillet – 2007

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

(وَمِنْ آيَاتِهِ أَنْ يُرْسِلَ الرِّيَّاحَ مُبَشِّرَاتٍ وَلِيُذِيقَكُمْ مِنْ رَحْمَتِهِ وَلِتَجْرِيَ
الْفُلُكُ بِأَمْرِهِ وَلِتَبْتَغُوا مِنْ فَضْلِهِ وَلَعَلَّكُمْ تَشْكُرُونَ)

«الآية 46 من

سورة الروم»

Remerciements

Merci allah de nous avoir accordé courage, patience et force durant toutes nos années d'études

Nous remercions vivement et tout particulièrement tous mes enseignants grâce aux quels nous avons reçu une très bonne formation pendant toutes nos années d'études

Nous tenons à remercier davantage et chaleureusement

**Notre encadreur monsieur Ezzeddine Merazega*

** Mr. Ali Chemsas chargé de cours*

** Dr. Ben Attous Djilani maître de conférence*

Nos vifs remerciements vont à tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à l'achèvement de ce projet et en particulier mr. Ben Bordi Bachir et Mihi Mounir.

الإهداء

الحمد لله الذي شرفنا بالإسلام وأكرمنا بالقرآن، وحبب إلينا
الإيمان وزينه في قلوبنا وكره إلينا الكفر والفسوق والعصيان
وهداننا إلى طريق النجاح والصلاة والسلام على من أرسله الله
رحمة للعالمين. وحجة على الجاحدين وقدوة للمتقين وخاتمة
لعباده المرسلين محمد وآله وصحبه أجمعين وبعد:

نهدي هذا العمل المتواضع لكل محب للعلم والعلماء ولكل من ساهم في
محاربة الجهل وإشعال
شمعة العلم والمعرفة وأتار درب النجاح ولكل أساتذتنا الكرام خاصة أستاذنا
المحترم

" عز الدين مرازقة " ولكل من ساهم في إنجاز هذا العمل

رملتنا الأجر

والتي والدي الكرّمين وأخوتي كل واحد باسمه أطال الله في عمرهم

أجمعين

والتي لكل من ساعدنا من قريب أو بعيد في هذا العمل

سديّة

عمارة

الإهداء

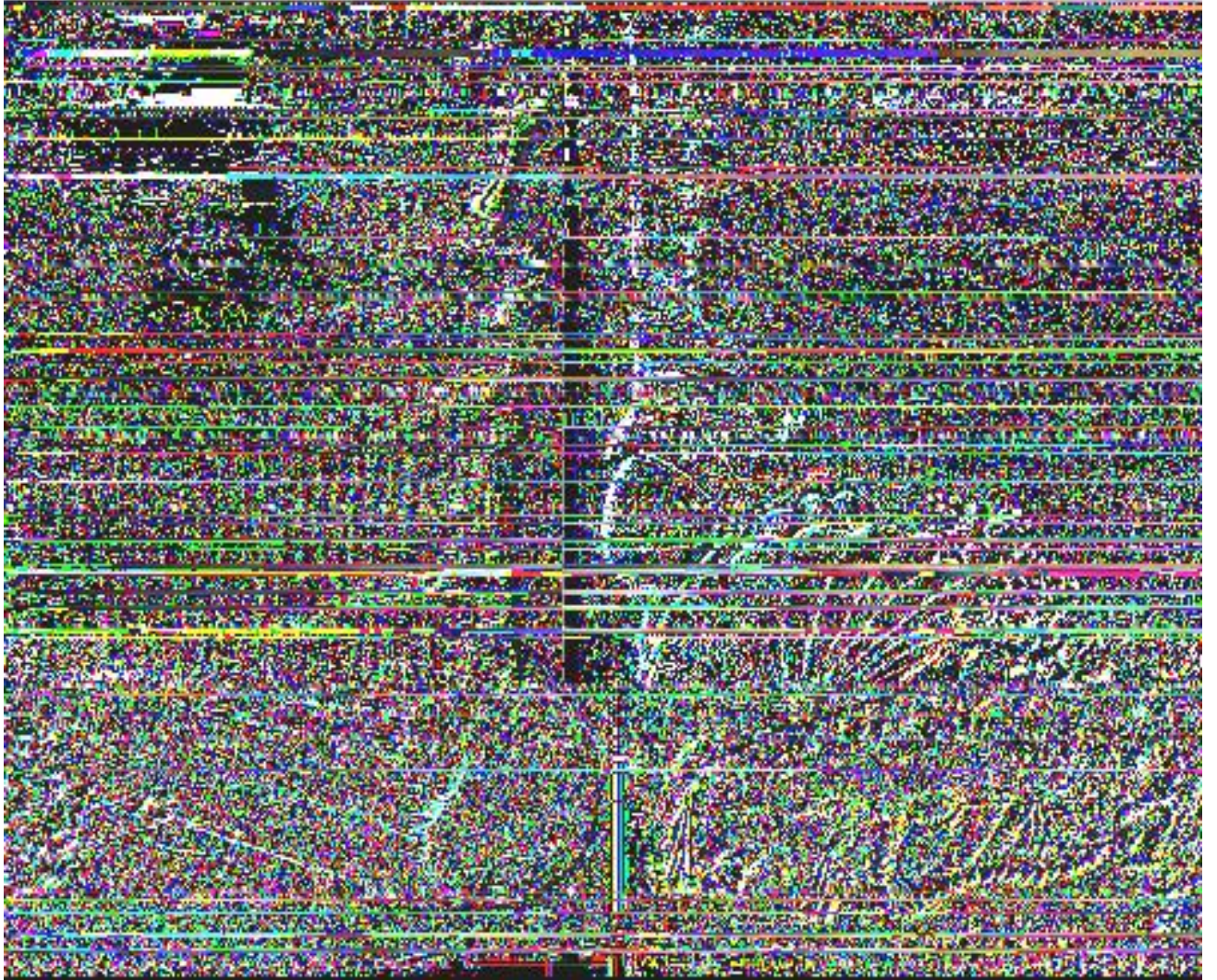
الحمد لله وحده والصلاة والسلام على من لا نبي بعده
الحمد لله ملكي السموات وملك الأرض وملك ما بينهما
وملك ما تحت من تحت بعد

اللهم صلي على سيدنا وحيبيينا محمد في الأولين وفي
الأخريين وفي الملى الأعلى إلى يوم الدين
إلى نبع الحنان الصافي والحب الصادق، إلى نور الإيمان التي تنير
دربي

أمي الغالية الحاجة عائشة بن بشير بوترة
إلى من بعث فيا الأمل و أنار لي الطريق وعلمني أن الحياة كفاح
والدي العزيز الحاج صحراي بن العيد بالعروسي إلى كل
عائلي إخواتي وأخواتي خاصة حكيم وعائدة وهاجرة
إلى كل من علمني ولو حرفا

إلى كل زملائي الذين رافقوني في حياتي الدراسية
إلى أهل العلم
إلى أهل القرآن

إلى كل هؤلاء جميعا أهدي ثمرة هذا الإنجاز المتواضع.
أحمد بالعروسي



Sommaire

Sommaire

Introduction générale	01
Objectifs du travail.....	02
Présentation du mémoire.....	02
No table of contents entries found. Références.....	bibliographiques

V : La vitesse du vent
H : L'hauteur du pylône
 α : L'exposant α caractérise le terrain
P_v : La puissance du vent (cinétique)
P : La puissance mécanique P récupérable
 Ω_1 : La vitesse de rotation avant multiplicateur
 Ω_2 : La vitesse de rotation après multiplicateur
R : Rayon de l'aérogénérateur
C_p : Coefficient de puissance (coefficient de betz)
D : Diamètre des pales (m).
r : Facteur du rendement
VR : La vitesse de rotation de l'hélice
 λ : Représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

Tep : Tonne équivalent pétrole. Kcal: Kilocalories.
TWH : Téra Watt heure.
Mw : Mega Watt.
KW : Kilo Watt.
KV : Kilo Volt.
V1 : La tension d'entrée
V2 : La tension de sortie
M : Rapport de transformation.
I₁ : Courant primaire.
I₂ : Courant secondaire.
I₁₀ : Courant magnétisent.
E₁ : Force électromotrice induit dans le primaire.
E₂ : Force électromotrice induit dans le secondaire.
r, i : Résistance et inductance de fuite (primaire et secondaire respectivement)
N_s : La vitesse synchronisme (la fréquence de rotation de champ statorique)
N : La vitesse de rotor
p : Nombre de pair de pôle de la machine
F : La fréquence d'alimentation
g : Le glissement
ws : La vitesse angulaire synchronisme
w : La vitesse angulaire de rotation
 ρ : la masse volumique de l'air

الإهداء

الحمد لله الذي تتم بنعمته الصالحات

أهدي ثمرة هذا الجهد
إلى رمزاً لحنان والدتي الكريمة
و إلى رمز الكفاح والدي العزيز
إلى إخوتي وأخواتي الأعزاء
إلى كافة الأقارب والأحباب
و إلى روح الفقيد عبد النور بن علي عليه رحمة الله
إلى جميع طلبة سنة خامسة شبكات كهربائية
إلى كل الأصدقاء كل باسمه
إلى كل من ساعدنا في إنجاز هذا العمل و
المتواضع

احمد الصالح عمار

Introduction
générale

Durant ces décennies passées, le monde s'est rendu compte des problèmes écologiques engendrés par son développement, et dont certains de ces problèmes affectent la terre entière, la pollution atmosphérique occasionnée par la production énergétique, le transport, la consommation des ressources naturelles et la production de déchets abîment la qualité de l'air dans pas mal de régions et entraîne les pluies acides, le réchauffement climatique et la destruction de la couche d'ozone, par conséquent, plusieurs technologies se sont développées dans le but de protéger l'environnement, et c'est le cas des énergies renouvelables qui toutes sont pratiquement venues du soleil, inépuisables, et reconstituées rapidement par la nature contrairement aux réserves limitées du gaz, du pétrole et du charbon les formes les plus connues d'énergies renouvelables sont : solaire, éolienne, hydraulique, géothermique, marémotrice et de biomasse .

Parmi ces énergies les plus utilisées au monde entier, l'énergie éolienne dont la source renouvelable est le vent qui est inexhaustible et abondant, et qui se résulte du déplacement de l'air d'une zone de haute pression vers une zone de basse pression, la découverte de cette énergie remonte à la fin des années de 20^{ème} siècle, l'exploitation de cette énergie est en train de prendre de l'extension à travers le monde étant donné que la production d'électricité, le pompage, et le chauffage sont réalisés par des éoliennes qui captent la puissance du vent et la transforment en potentiel mécanique à l'aide d'un système de transmission (conversion) et qui peut être utilisé sous différentes formes dont on obtiendra les formes suivantes :

- *Energie mécanique pour l'entraînement des pompes à piston ou centrifuge, compresseur pour la production d'air comprimé, compresseur de pompe à chaleur, etc...*
- *Energie calorifique par frein hydraulique, courant de Foucault, etc...*
- *Energie électrique produite par des génératrices à courant alternatif ou continu .*

Aujourd'hui grâce à la technologie on peut passer de l'énergie mécanique à l'énergie électrique d'une manière plus simple et plus flexible à la fois, en fait, les éoliennes deviennent alors des aérogénérateurs, et leur utilisation correcte demande un choix très judicieux du site d'implantation en fonction des vitesses moyennes du vent .

Il est indispensable d'obtenir de renseignements météorologiques sur les caractéristiques du vent Avant toute exploitation d'une station d'énergie éolienne sur un site quelconque .

Le système éolien, peut être représenté par un modèle mathématique qui permettra de donner une image du système observable expérimentalement et de prédire son comportement dans des situations diverses et ainsi que de prédire le système de régulation convenable, le thème de notre travail est l'étude de la conception d'un système éolien de production d'électricité avec son dispositif de régulation .

Objectifs du travail

Dans ce travail de mémoire trois objectifs étaient visés:

- ✚ Effectuer une recherche bibliographique passant en revue les énergies renouvelables. ensuite présenter un état de l'art sur la production de l'énergie électrique à l'aide des éoliennes.*
- ✚ Etude de conception d'un système éolien.*
- ✚ Modulation et simulation d'un système éolien.*

Présentation du mémoire

Ce mémoire est constitué de quatre chapitres comme suit :

- ✚ Le premier chapitre présentera en premier lieu le concept des énergies renouvelables en passant en revue les différentes formes d'énergies existantes.*
- ✚ Le deuxième traitera en particulier l'énergie éolienne et sa conversion en énergie électrique.*
- ✚ Le troisième chapitre présentera une étude de conception d'une éolienne .*
- ✚ Le quatrième chapitre en vu la modélisation et la simulation du système éolien.*

En fin une conclusion générale qui exposera le travail accompli, les problèmes rencontrés, les perspectives et suggestions pour la continuité de ce travail.

Chapitre un

Les énergies renouvelables

1.1 Introduction

L'énergie est nécessaire dans toutes nos activités quotidiennes pour la production du chauffage, de l'électricité, dans l'industrie, pour la construction et dans les transports. Depuis que l'industrialisation a commencé, il y a plus de 200 ans, la richesse économique a été immédiatement liée avec l'accès aux combustibles fossiles pour la production énergétique, en premier lieu le charbon, mais plus récemment le pétrole et le gaz. Le problème de la consommation d'énergie est devenu de plus en plus important, des inquiétudes concernant les effets de la croissance économique sur la consommation excessive des ressources naturelles et de l'impact sur l'environnement, en particulier l'atmosphère, ont été notées, [1]: augmentation de l'effet de serre, pollution atmosphérique, pollution des sols, pollution des eaux et pluies acides.

Pour résoudre ce problème, des politiques énergétiques de développement ont été conduites pour exploiter au mieux les ressources en énergies renouvelables existantes. Les technologies mises en œuvre sont très importantes et font appel au génie électrique et aux matériaux de pointe,[2]. Les énergies renouvelables comme les énergies: solaire, éolienne, hydraulique, géothermique, marémotrice et de la biomasse sont des énergies de flux, on les oppose aux énergies fossiles qui sont disponibles sous forme de réserve.

Dans ce chapitre, on commencera par la présentation du concept des énergies renouvelables et leurs historiques. Par la suite on va présenter ces énergies en résumant leurs avantages et leurs inconvénients. On terminera par une synthèse sur l'énergie éolienne en particulier, car elle fera l'objet de ce présent mémoire.

1.2 Répartition des sources primaires d'énergie dans le monde

Aujourd'hui 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 figure 1-1, montre la répartition en termes d'énergie primaire dans le monde pour toutes les ressources actuelles. Les formes de production d'énergies non renouvelables engendrent une forte pollution environnementale par rejet des gaz à effet de serre, qui 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, [3].

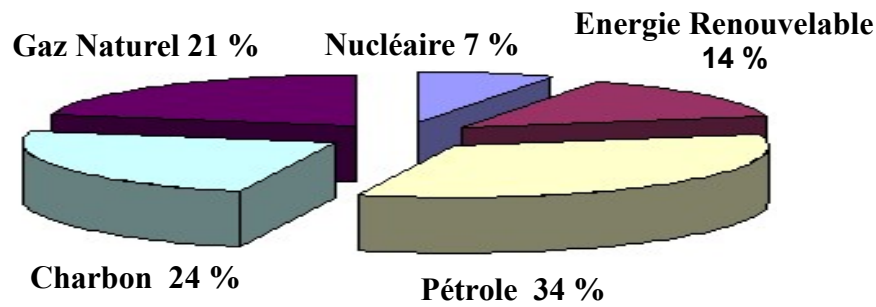


Figure 1.1: Répartition des sources primaires d'énergie dans le monde.

1.3 Energie renouvelable

1.3.1 Définition

L'énergie renouvelable se rapporte à la puissance développée par une source renouvelable. C'est à dire, quand l'énergie est produite, la ressource n'est pas épuisée. Elle est naturellement reconstituée, ses réserves sont tellement importantes que l'homme ne puisse jamais les épuiser. On dira alors qu'une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. L'expression «énergie renouvelable» s'applique à plusieurs sources d'énergies qui ont un point en commun; elles produisent toutes de l'énergie électrique, thermique ou mécanique sans épuiser les ressources naturelles, [4], exemple: le vent, le soleil, l'eau, la biomasse, etc..., tant que cet équilibre entre la consommation actuelle et la disponibilité future de la ressource est respecté, on parlera d'énergie renouvelable. Le mot renouveler veut dire remplacer. Renouveler l'énergie, c'est aussi remplacer l'énergie fossile qui exploite le charbon, le pétrole et le gaz qui sont des réserves limitées et qui polluent l'environnement, par des énergies dont les ressources sont inépuisables et non polluantes, qu'on appelle aussi énergie de remplacement.

1.3.2 Historique

L'utilisation des énergies renouvelables a prédominé jusqu'à la révolution industrielle au 18ème siècle. Elles ont commencé à être substituées par le charbon puis par l'exploitation intensive du pétrole et du gaz à partir du début du 19ème siècle. Cette tendance s'est poursuivie au 20ème siècle avec l'utilisation accrue des énergies fossiles et l'avènement du nucléaire, [5]. Après le premier choc pétrolier en 1973, certains pays industrialisés ont commencé à s'intéresser à nouveau aux énergies renouvelables, mais elles étaient très vite oubliées à cause de l'effondrement des prix des cours des énergies fossiles dans les années 80. Mais le malheureux accident de Tchernobyl, à la fin des années 80 a été la cause de la re-exploitation à nouveau des sources renouvelables .

1.3.3 Intérêt des énergies renouvelables

Les énergies renouvelables qui se définissent comme celles dont la source ne peut se tarir, possèdent un certain nombre d'atouts aussi bien financiers qu'environnementaux.

1.3.3.1 Intérêt économique

1- Une source renouvelable: Le principal atout des énergies solaires, éoliennes et hydrauliques est d'être renouvelables:

- ✗ Pas de risque de pénurie, de rupture de stock;
- ✗ La matière première (sauf pour le bois) est gratuite;
- ✗ Une source locale pour un développement local: ceux sont des ressources locales offrant une autonomie énergétique appréciable en zone montagneuse ou dispersée.

2- Aspect financier: L'évolution financière a cette échelle ne peut être faite sous le seul angle de l'investissement énergétique mais doit tenir compte des bénéfices induits; emplois, commerces, nouveaux débouchés..., par ailleurs, tous ces équipements sont destinés à être utilisés sur de longues périodes (20 à 50 ans).

- ✗ Le coût des systèmes ne peut aller qu'en s'abaissant avec leur développement;
- ✗ Le coût de maintenance (généralement faible) est connu à l'avance;
- ✗ L'approvisionnement en ressource primaire est indépendant des variations du marché de l'énergie (pour cause de gratuité!).

1.3.3.2 Intérêt environnemental

1- Elles ne génèrent pratiquement pas de pollution :

- ✗ Pas de gaz à effet de serre ;
- ✗ Peu ou pas de déchets (aussi bien dans l'environnement immédiat que sur le reste de la planète) ;

2- Pas de nuisances sonores ;

3- Pas de nuisances olfactives ;

4- Très faibles nuisances visuelles (en comparaison des infrastructures nécessaires aux autres énergies) ;

5- Pas d'infrastructures (lignes, poteaux, transformateurs, etc.) dans les zones sensibles et protégées (sites classés, parcs naturels régionaux).

6- Pas de trouées dans les forêts et autres paysages, pas d'entretien de lignes; etc.

1.3.4 Avantages et inconvénients

Leur caractère renouvelable bien sûr qui fait qu'on ne prive pas les générations futures de ressources rares:

- 1- L'absence de problèmes liés au rejet de gaz à effet de serre.
- 2- Le fait que l'énergie produite est électrique (la forme thermo dynamiquement la plus souple d'utilisation).

Mais, aussi leurs inconvénients:

- 1- Elles occupent un espace souvent revendiqué pour d'autres usages (vallées pour l'hydraulique, côtes et crêtes pour les éoliennes);
- 2- Elles sont très capitalistique (il faut bien payer pour concentrer l'énergie et refaire ce que la nature a fait seule dans le cas des énergies fossiles), [6].

1.3.5 Classement des sources d'énergie

Les différentes sources d'énergie peuvent être classées selon leur capacité calorifique : c'est pourquoi on les convertit en tonnes équivalent pétrole (tep). Par exemple, 1 kg de pétrole produit 10000 kilocalories (kcal), alors que la même masse de charbon cède 7000 kcal et que 1 kg de gaz naturel fournit environ 8000 kcal. La tonne équivalent pétrole (tep) est l'unité permettant de comparer les sources d'énergie au pétrole brut. Par convention, 1 t de pétrole correspond à 1,5 t de charbon ou à 1000 m³ de gaz naturel. On estime que 1 tep = 4500 kWh; [7].

1.3.6 L'énergie renouvelable dans le monde

Les deux tiers de la consommation de la planète concernaient un peu moins de 20 % de la population mondiale. Les États-Unis consommaient 1407 Mtep, l'Union européenne, 961 Mtep et le Japon, 316 Mtep, comme montre le tableau 1.1.

Pays	Etats-Unis	Union européenne	Japon
Consommation (Mtep)	1407	961	316

Tableau 1.1 : Consommation d'énergie des pays développés.

En Europe, l'Allemagne consommait 243 Mtep, la France et la Grande-Bretagne 152 Mtep l'Italie 122 et l'Espagne 63 Mtep .

Aujourd'hui, la France utilise 79 Mtep par an. La production française annuelle s'élève à 450,6 téra watt heures (TWh), dont elle en consomme 356,2 TWh. Les États-Unis produisent 3211 TWh et en consomment 2873,9 TWh ; en seconde position vient le Japon, qui en produit 855,5 TWh et en consomme 796,6 TWh ; ensuite le Canada, dont la production atteint les 515,8 TWh et la consommation, 431,4 TWh. En quatrième position se situe l'Allemagne, avec une production de 487,7 TWh et une consommation de 467,2 TWh, l'Algérie produit 30 TWh et en consomme 23 TWh.

Ces statistiques sont représentées sur le tableau 1.2.

Pays	Production (TWh)	Consommation (TWh)
Etats-Unis	3211	2873.9
Japon	855.5	796.6
Canada	515.8	431.4
Allemagne	487.7	467.2
France	450.6	356.2
Algérie	30	23

Tableau 1.2 : La production et la consommation de l'énergie des pays industrialisés.

D'après certains spécialistes, en 2000, le potentiel annuel d'énergies renouvelables était de 3 365 Mtep (mégatonnes équivalent pétrole) pour le monde entier, dont près de 1 650 Mtep provenant du bois, 880 Mtep, de l'énergie hydraulique, 505 Mtep, des déchets industriels, 200 Mtep en énergie solaire, 70 Mtep en combustibles énergétiques et 60 Mtep en énergie éolienne, [7].

1.3.7 L'énergie renouvelable en Algérie

Dans notre pays, les énergies renouvelables n'ont pas connu le développement que permet leur disponibilité, et qu'impose leur importance pour le développement économique et social.

Trois raisons principales plaident en faveur d'un développement des énergies renouvelables en Algérie :

1. Elles constituent une solution économiquement viable pour fournir des services énergétiques aux populations rurales isolées notamment dans les régions du Grand Sud
2. Elles permettent un développement durable du fait de leur caractère inépuisable, et de leur impact limité sur l'environnement et contribuent à la préservation de nos ressources fossiles;

3. La valorisation de ces ressources énergétiques ne peut qu'avoir des retombées positives en matière d'équilibre régional et de création d'emplois.

La loi sur la maîtrise de l'énergie de Juillet 1999 affiche la volonté des pouvoirs publics pour une redynamisation de la politique énergétique et fixe un nouveau cadre juridique pour la gestion et l'orientation de la demande d'énergie à tous les niveaux de la chaîne énergétique.

Cette politique énergétique s'articule autour des préoccupations d'utilisation rationnelle de l'énergie, de promotion des énergies renouvelables et de protection de l'environnement; ainsi plusieurs actions sont proposées pour la mettre en place et portent sur l'ensemble de la chaîne allant de la recherche à la distribution, [8].

1.4 Principales énergies renouvelables

1.4.1 Energie solaire

1.4.1.1 Définition

Le soleil est une gigantesque source d'énergie et depuis l'antiquité les hommes ont toujours rêvé d'appivoiser sa puissance, La terre reçoit du soleil, environ 10000 fois la quantité totale d'énergie consommée par l'ensemble de l'humanité (équivalent à une puissance de 16.1015 kWh/m² et par an). En d'autres termes, capter 0.01% de cette énergie nous permettrait de nous passer de pétrole, de gaz, de charbon et d'uranium, [6].

- **Energie solaire passive**

C'est l'art de planifier l'architecture d'une maison afin de bénéficier des rayons du soleil Pour réduire les besoins en chauffage.

Les principes de base sont :

- ◆ Orientation de la maison vers le sud ;
- ◆ Grandes fenêtres de ce coté ;
- ◆ Petites fenêtres sur le coté Nord ;
- ◆ Choix de matériels ayant une bonne masse thermique pour absorber la chaleur pendant la journée et la libérer pendant la nuit.

Il s'agit d'une technologie peu chère qui permet de faire des économies spectaculaires. Comme la plupart des maisons construites aujourd'hui seront toujours intactes lorsqu'on aura épuisé les réserves d'énergies combustibles, il faut absolument tenir compte de ces principes.

- **Energie solaire active**

Elle utilise des capteurs plans pour concentrer la chaleur de la lumière pour chauffer un liquide. L'essentiel est de "piéger" cette chaleur en créant un petit "effet de serre". Les installations les plus simples de ce type chauffent l'eau pour les besoins en eau chaude des ménages. Cette technique permet aussi de chauffer une maison en faisant circuler l'eau chaude dans les murs sous le plancher.

- **Photovoltaïque**

Les photopiles de la technologie photovoltaïque n'ont rien à voir avec l'énergie solaire thermique. Elles n'utilisent pas la chaleur, mais transforment l'énergie des photons directement en électricité grâce à des cellules solaires photopiles qui sont fabriqués avec des matériaux semi-conducteurs, [6].

Les figures 1.2, et 1.3, représentent des exemples de capteurs plans, qui sont surtout utilisés dans la production d'eau chaude sanitaire, et capteurs fixes à usage domestique, qui sont généralement installés sur le toit des habitations.



Figure 1.2 : Exemple de capteur plan

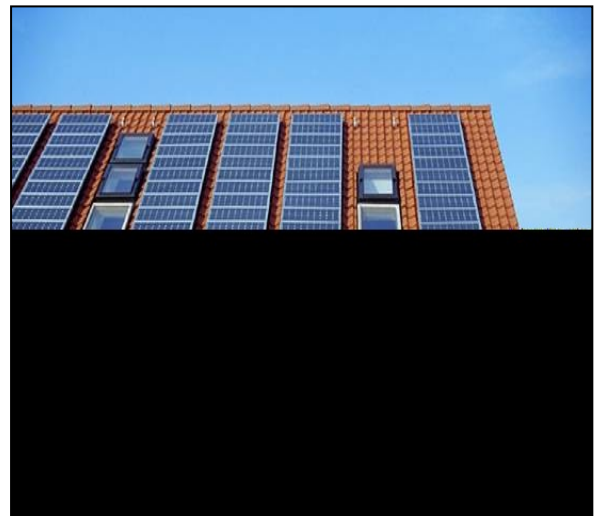


Figure 1.3 : Exemple de panneau solaire

1.4.1.2 Avantages et inconvénients

Par rapport aux énergies classiques, l'énergie solaire possède les avantages suivants :

1. Après avoir recouvert les coûts initiaux, l'énergie émanant du soleil est pratiquement gratuite;
2. Selon la façon dont l'énergie est utilisée, les périodes de récupération peuvent être très courtes lorsqu'on les compare au coût des sources d'énergie généralement utilisées;

3. Le soleil fournit une alimentation quasi illimitée en énergie solaire;
4. L'utilisation de l'énergie solaire supplante l'énergie classique. Cela permet de diminuer de façon significative les émissions des gaz à effet de serre.

Parmi les Inconvénients on cite :

1. Source de faibles intensité et intermittente qui dépend de l'ensoleillement;
2. Coût élevé des installations pour le chauffage;
3. Coût élevé des cellules photovoltaïques;
4. L'énergie solaire est beaucoup plus coûteuse que les sources d'énergie conventionnelles, ceci revient au problème classique de l'offre et de la demande;
5. Elles ne conviennent pas pour le moment aux utilisations à forte consommation d'énergie;
6. L'énergie solaire ne fonctionnant qu'en présence du soleil, le jour, voit son utilisation limitée la nuit alors que la demande est importante, [9].

1.4.2 Energie géothermique

1.4.2.1 Définition

La terre produit de la chaleur, qui provient essentiellement de la désintégration naturelle de l'uranium, du thorium ou du potassium. Une partie de cette chaleur, dite "fluide vert", est stockée dans certaines parties du sous-sol, en général dans des nappes d'eau souterraines. L'énergie géothermique est cette énergie calorifique stockée sous la surface terrestre. L'énergie géothermique utilise la vapeur d'eau ou l'eau chaude présente dans la croûte terrestre pour faire fonctionner des turbines ou pour chauffer des bâtiments ou de l'eau.

Si les caractéristiques géographiques le permettent, il est possible de bâtir des installations géothermiques. Les installations récoltent l'eau qui s'écoule par des fentes ou des trous dans le roc souterrain. Cette énergie nécessite une température à la source de plus de 100°C afin de faire fonctionner une turbine.

On distingue en effet la géothermie de haute température, ou celle-ci est suffisamment élevée pour qu'il soit possible et rentable de produire de l'électricité, et la géothermie de basse température, qui permet une utilisation de fluide à des fins de chauffage.

Les stocks souterrains d'eau chaude peuvent être considérés comme renouvelables dans le sens où ils sont en permanence réchauffés par la chaleur du centre de la terre, estimée à 4000°C. La condition étant que le rythme d'exploitation de ces stocks n'excède pas celui du renouvellement, La figure 1.4, montre un exemple de centrale géo thermoélectrique, il s'agit de la centrale de Hatchobaru au Japon, de 300 MW, [10].



*Figure 1.4 : Centrale géo thermoélectrique de Hatchobaru
(Japon 300 MW)*

1.4.2.2 Avantages et inconvénients

1. Elle peut être considérée comme l'énergie la moins chère pour éviter l'émission de gaz carbonique;
2. C'est une énergie propre qui n'émet pas ou peu de polluants. Son exploitation ne génère pas de flamme, pas d'odeurs, pas de fumée, pas de ramonage, etc.

Les inconvénients sont :

1. Selon la nature du sol, les coûts de forage peuvent être très élevés. Mais si la mise en place d'une installation géothermique correspond à un investissement important, le coût d'exploitation est quasiment nul;
2. L'épuisement de la source est possible sur certains stocks trop petits lors de leur exploitation;
3. L'expansion de la géothermie se heurte également à l'absence de réelle volonté politique, exprimée notamment dans la lourdeur des taxes;
4. Les seuls risques de pollution existants sont de rejeter à la surface du sol l'eau extraite si celle-ci contient des métaux lourds. Ce risque est évité lorsqu'elle est réinjectée en sous-sol;
5. Risque de glissement de terrain;
6. Elle doit être utilisée près de son site de production,[10].

1.4.3 Biomasse

1.4.3.1 Définition

Les déchets liquides ou solides et les plantes peuvent servir de combustible pour la production d'électricité. Le bois, les déchets agricoles et le fumier restent les principales sources d'énergie dans beaucoup de pays en voie de développement. On cherche aussi à cultiver des végétaux à croissance rapide et à fort rendement, dont la biomasse peut être exploitée. Chaque année, dans le monde, les diverses céréales produisent près de 1 700 millions de t de paille dont la majeure partie, qui est inutilisée ou brûlée dans les champs, pourrait être récupérée. La paille représente un combustible aussi intéressant que le charbon, et la France en produit chaque année 30 millions de t.

On trouve la biomasse dans plusieurs résidus communs, tel que :

- Les résidus agricoles ;
- Les résidus forestiers ;
- Les résidus urbains ;
- Les résidus provenant de la transformation des aliments, [6].

1.4.3.2 Avantages et inconvénients

1. Il est possible d'utiliser la biomasse indéfiniment comme source d'énergie parce que la matière végétale se renouvelle continuellement;
2. L'utilisation de la bioénergie ne provoque aucune augmentation des gaz à effet de serre, mais peut réduire la quantité de méthane, émis par la matière végétale en décomposition;
3. La bioénergie a, en général, une incidence favorable sur les économies locales;
4. Un plus grand nombre d'emplois peut être créé parce qu'une main d'œuvre plus importante est nécessaire pour manipuler les combustibles issus de la biomasse.
5. L'utilisation de la biomasse offre des avantages significatifs à d'autres industries locales, par exemple, l'élimination des arbres morts, malades ou de mauvaise qualité des forêts;
6. Les matières qui forment la biomasse sont souvent des rebuts provenant des activités industrielles, leur élimination diminue la nécessité d'agrandir les sites d'enfouissement locaux tout en produisant une énergie utile.

Les inconvénients de cette source d'énergie sont :

1. Beaucoup de déperditions de chaleur par combustion;
2. Autres méthodes d'extraction d'énergie complexes et coûteuses;

3. La lourdeur des investissements à consentir qui, malgré des frais de fonctionnements très faibles (plus ou moins 2 % de l'investissement), sont économiquement assez dissuasifs;
4. Le biogaz est un gaz hautement inflammable et nécessite des mesures de protections, [6].

1.4.4 Hydroélectrique

1.4.4.1 Définition

L'énergie hydroélectrique est la production d'énergie utilisable sous forme d'électricité à partir de l'eau. Cette électricité est produite par un générateur, une fois que l'eau en mouvement est passé à travers une turbine, figure 1.5, présente un schéma de principe d'une centrale hydraulique.

Etant donné que les systèmes naturels comme les rivières contiennent déjà une grande partie de ces éléments, elles peuvent être utilisées. Dans le cas où le mouvement naturel de l'eau ne serait pas possible ou insuffisant pour la production d'énergie, il est possible de rencontrer des systèmes comme les barrages où l'eau est dirigée sur une turbine en sous-sol, puis pompée pour être ramenée à sa source après utilisation (en générale pendant les heures creuses de consommation de l'électricité).

L'énergie hydroélectrique est une source d'énergie renouvelable, cela signifie que la source qui fournit l'énergie peut être renouvelée. En effet contrairement aux sources non renouvelables, on n'épuise pas complètement l'eau. On la trouve après qu'elle a été utilisée pour la production d'énergie, [6].

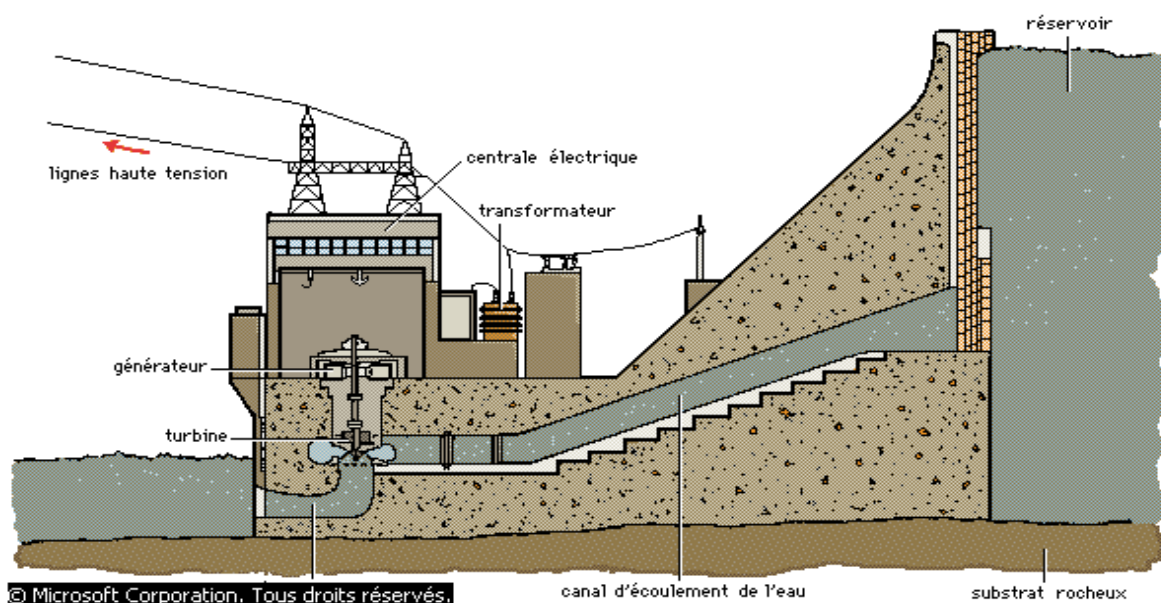


Figure 1.5 : Exemple du principe d'une centrale hydraulique

1.4.4.2 Avantages et inconvénients

Le développement de l'énergie hydroélectrique pendant ces cent dernières années a montré que la technologie est mature, faisant de l'eau la première source d'énergie renouvelable utilisée dans le monde.

Ses avantages sont :

1. L'énergie hydroélectrique est une source d'énergie électrique continuellement renouvelable;
2. On peut utiliser une proportion assez importante de l'énergie hydraulique et les coûts opératoires et de maintenance sont assez faibles;
3. L'énergie hydroélectrique est non polluante; aucune chaleur ni aucun gaz nocif n'est émis;
4. Les centrales hydrauliques, ont des durées de vie de deux à dix fois celles des usines à charbon ou nucléaire, bon nombre d'entre elles sont en activité depuis plus d'un demi-siècle et fonctionnent toujours efficacement;
5. La technologie de l'énergie hydroélectrique est une technologie qui a fait ses preuves et qui offre un fonctionnement fiable et souple;
6. Les barrages qui sont utilisés dans ces usines aident à éviter les inondations et fournissent un débit d'eau d'irrigation régulier aux régions en aval du barrage.

Cependant il y a quelques inconvénients :

1. Production d'électricité caractérisée parfois par des fluctuations importantes suite à la grande variabilité des débits de certains sites;
2. Coûts d'investissement pouvant être assez importants pour certaines installations;
3. Nécessité d'avoir des sites appropriés en terme de cours d'eau et de chutes ;
4. Les usines prenant beaucoup d'espace et peuvent empiéter sur l'habitat des animaux
5. Les projets à grande échelle peuvent menacer les débits des rivières;
6. Du fait de la présence de barrage et de réservoirs les poissons peuvent ne pas être capables de rejoindre la mer et la vie aquatique peut diminuer dans les régions autour des centrales hydrauliques, [6].

1.4.5 Energie des vagues (marémotrice)

1.4.5.1 Définition

Aussi classée dans l'énergie hydraulique, le développement de nouvelles technologies commence à exploiter le potentiel important de l'océan. Les vagues sont une source d'énergie renouvelable et gratuite, créer par le vent quand il souffle sur la surface de la mer. Plus les distances impliquées sont grandes, plus les vagues sont puissantes. L'énergie est stockée de cette

manière jusqu'à ce qu'elle atteigne les zones peu profondes et les plages, où elle est libérée, parfois avec des effets destructifs. L'océan occupant plus que les 2/3 de la surface de la Terre, il est évident que le potentiel est immense, [7].

Figure 1.6 : Usine marémotrice de la Rance 240 MW

La production d'électricité à partir des vagues et des marées est aujourd'hui une option. Environ deux fois par jour lors des marées montantes et descendantes, l'eau s'écoule dans les estuaires et sur les côtes. Cette eau peut actionner des turbines, afin de produire de l'électricité. Aujourd'hui la France et le Canada possèdent les plus grosses installations marémotrices. La figure 1.6, présente une usine marémotrice de la Rance 240 MW, [6].

1.4.5.2 Avantages et inconvénients

Parmi les avantages on site les suivants :

1. Energie gratuite;
2. L'énergie des vagues est plus utile et mieux adaptée pour l'alimentation en électricité des îles éloignées où toute autre manière de l'alimenter en électricité est limitée et coûteuse;
3. C'est une bonne idée que d'intégrer l'énergie des vagues dans des projets de cogénération afin d'optimiser la production d'énergie;
4. Il y a également un fort potentiel pour la production d'électricité à partir des vagues ou pour les industries de désaliénation de l'eau, dans des pays côtiers ayant des problèmes d'alimentation en eau douce, tels sur le continent africain et au Moyen Orient.

L'énergie des vagues possède certains inconvénients, on site les suivants :

1. L'énergie des marées ne peut fournir qu'une petite contribution à l'approvisionnement en énergie, car il y a peu de sites permettant ce type d'installation;

2. Les coûts de construction sont élevés et les risques de détérioration du matériel à cause du sel sont trop importants. Cependant il y a quelques régions qui possèdent les bonnes conditions pour produire de l'énergie grâce aux marées;
3. Variation de la production en fonction de l'amplitude des marées;
4. Conséquences sur l'environnement;
5. Les centrales énergétiques à marée-motrice ont besoin pour produire de l'électricité; de turbines spéciales tournant dans les deux sens, utilisant les marées montantes et descendantes, de plus, il est nécessaire d'avoir des marées importantes. De ce fait, les sites pouvant accueillir des projets de marée-motrice sont peu nombreux,[9].

1.4.6 Eolienne

1.4.6.1 Définition

L'énergie éolienne convertit l'énergie cinétique tirée du vent en d'autres formes d'énergie très utiles, notamment l'énergie mécanique ou l'électricité. L'énergie éolienne s'avère une source d'énergie non polluante et durable. Les moulins à vent qui servaient à moudre le grain constituent un exemple des premières utilisations de l'énergie éolienne. Cette dernière est maintenant utilisée pour produire de l'électricité ou pomper l'eau. L'énergie électrique produite par les aérogénérateurs peut être distribuée par le biais d'un réseau ou utilisée en complément des générateurs autonomes dans les collectivités non reliées à un réseau. La puissance et le débit d'énergie d'une éolienne augmentent en fonction de la hausse de la vitesse du vent, [12]. La figure 1.7, montre trois utilisations de l'énergie éolienne: (a) pompage de l'eau, (b) un moulin à vent et (c) la production de l'électricité.



Figure 1.7 : Exemples d'éoliennes

1.4.6.2 Avantages et inconvénients

1. L'énergie éolienne est une énergie renouvelable idéale parce que :

- ⊕ Il s'agit d'une forme d'énergie indéfiniment durable et propre;
- ⊕ Elle ne nécessite aucun carburant;
- ⊕ Elle ne crée pas de gaz à effet de serre;

2. Elle ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs;

3. La plupart des éoliennes sont silencieuses et ne présentent aucun danger important pour les

oiseaux ou les autres espèces sauvages;

4. Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement 2 % du

territoire environ est requis pour les éoliennes. La surface restante est disponible pour l'exploitation

de l'agriculture, l'élevage et d'autres utilisations;

5. Chaque MWh d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO₂ produites chaque année par la production d'électricité avec le charbon ou le diesel;

6. Outre les nombreux avantages qu'elle partage avec les autres sources d'énergie renouvelable (qu'on vient de citer), l'exploitation de l'énergie du vent présente une série d'avantages propres:

7. L'énergie éolienne est modulable et peut être parfaitement adaptée au capital disponible ainsi qu'au besoin en énergie; il n'y a pas donc d'investissement superflus. Cette modularité permet de maintenir en fonctionnement la plus grande part de l'installation lorsqu'une pièce est défectueuse ;

8. Les frais de fonctionnement sont assez limités étant donné le haut niveau de fiabilité et la relative simplicité des technologies mises en œuvre ;

9. Le prix de revient d'une éolienne connaît une tendance à la baisse suite aux économies d'échelle réalisées sur leur fabrication ;

10. Techniquement au point, les éoliennes sont rentables dans les régions les plus ventées ;

11. La période de haute productivité, située souvent en hivers où les vents sont plus forts, correspond à la période de l'année où la demande d'énergie est la plus importante.

Les principaux impacts environnementaux des fermes éoliennes sont les suivants :

1. Les effets sur le paysage;
2. Le bruit;
3. La perturbation de l'écologie locale des sites;
4. Les interférences électromagnétiques;
5. La sécurité;

6. Coût important ;

7. Variations importantes des quantités fournies qui dépendent de l'intensité des vents d'où la nécessité de faire appel à d'autres sources;
8. Ils ont un impact visuel nuisible, et peuvent être bruyantes lorsqu'il y a beaucoup de vent;
9. Les emplacements appropriés pour des parcs d'éoliens sont souvent dans des zones protégées, [9].

1.5 Conclusion

Au rythme de la consommation actuelle, dans les pays industrialisés, un habitant utilise près de 5 tonnes de pétrole par an, selon de nombreux experts, les réserves de pétrole seraient épuisées dans une cinquantaine d'années et un peu plus par le gaz ; celles du charbon, dans deux cents ans. Selon le conseil mondial de l'énergie, les sources d'énergies renouvelables ne pourront couvrir au mieux que 30% des besoins mondiaux vers 2020 (même si certains estiment que ce chiffre pourrait être de 60% vers 2100), [9].

Dans ce chapitre nous avons passé en revue les différents types d'énergies renouvelables ainsi que leurs importances, leurs avantages et inconvénients.

Dans ce chapitre qui suit nous étudierons l'énergie éolienne.

Dans le prochain chapitre nous étudierons plus en détails la conversion de l'énergie éolienne.

Chapitre deux

L'énergie éolienne

2.1 Introduction

L'énergie éolienne est l'énergie cinétique présente dans l'air en mouvement. La quantité d'énergie produite dépend principalement de la vitesse du vent, mais elle est aussi légèrement affectée par la densité de l'air, cette dernière étant déterminée à son tour par la température, la pression barométrique et l'altitude.

Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en des formes d'énergie plus utiles, notamment l'énergie mécanique ou l'électricité. L'énergie éolienne ne produit pas de pollution et constitue une forme d'énergie indéfiniment durable. Elle n'utilise pas de carburant, ne produit pas de gaz à effet de serre ni de déchets toxiques ou radioactifs.

L'intérêt actuel pour l'énergie éolienne provient du besoin d'élaborer des systèmes d'énergie propre durables auxquels on peut se fier à long terme. L'aérodynamique et l'ingénierie modernes ont permis d'améliorer les éoliennes. Maintenant, elles offrent une énergie fiable, rentable, non polluante pour les applications des particuliers, des communautés et pour les applications nationales.

2.2 Le vent

2.2.1 Définition

Le rayonnement solaire est absorbé de façon très différente aux pôles et à l'équateur du fait de la rotondité de la terre. L'énergie absorbée à l'équateur est donc très supérieure à celle absorbée aux pôles, ces variations de température provoquent des différences de densité d'une altitude à une autre. Ce déplacement s'effectue des zones où la densité de l'air (pression atmosphérique) est élevée vers celle où elle est faible, [13]. La rotation de la terre crée une tâche appelée force de Coriolis (d'après le mathématicien français Gustave Gaspard Coriolis, 1792-1843), sous son influence, les vents adoptent une rotation dans le sens anti-horlogique autour des dépressions dans l'hémisphère Nord et horlogique autour des dépressions dans l'hémisphère sud, [4]. Donc le déplacement de masse d'air entre ces zones de température différentes, est appelé: « vent ».

Le vent est une grandeur vectorielle tridimensionnelle, il est caractérisé par deux grandeurs variables par rapport au temps: la vitesse et la direction.

Comme ces deux grandeurs sont variables, on mesure la valeur moyenne sur des intervalles réguliers de temps.

2.2.2 Unités de mesure de la vitesse du vent

La vitesse du vent peut être exprimée par différentes unités :

Mètre par seconde (m/s)

Kilomètre par heure (km/h)

Noeud (kt)

Parce que le noeud a été longtemps utilisé en marine et puis en aviation, il est utilisé aussi en météorologie. Un mille marin vaut environ (1 852 m) par heure, soit 0,514 m/s, [6].

2.2.3 Instrument de mesure de la vitesse du vent

L'instrument qui sert à mesurer la vitesse du vent est nommé Anémomètre, il a pour but de déterminer la vitesse du vent, il est placé à 10m du sol. La figure 2.1, illustre un anémomètre qui possède trois coupelles en forme de demi sphères orientées dans le même sens et qui sont libres de tourner. Il y a aussi un petit écran pour nous indiquer la vitesse du vent. La plupart des anémomètres modernes comprennent un système électronique interne qui calcule le nombre de tours que font les coupelles pendant un temps précis, [14].



Figure 2.1: Anémomètre

2.2.4 Mesure de la direction du vent

La direction du vent est toujours donnée par la direction d'origine. On parlera par exemple d'un vent du nord lorsque le vent souffle du nord vers le sud.

L'instrument qui sert à déterminer la direction du vent est nommé Girouette est présenté par la Figure 2.2. C'est un pointeur (généralement une flèche) qui tourne selon la direction du vent. Il

est important de noter que la pointe de la flèche montre la direction d'où provient le vent. Souvent, les quatre points cardinaux sont indiqués par les lettres N, S, E et O et nous servent de repère. On place habituellement la girouette à 10 m du sol. Son unité de mesure est le Degré par rapport au nord géographique ou les points cardinaux, [15].



Figure 2.2 : Exemple d'une girouette.

2.2.5 Choix du site

Par suite de l'irrégularité des vents, la rentabilité d'une machine éolienne dépendra beaucoup du site sur lequel elle est installée et sera liée aussi à son utilisation.

Les sites les plus intéressants sont situés au bord de la mer ou aux sommets de collines et de montagnes bien dégagées. Toutefois dans ces premiers lieux se posent des problèmes de corrosion et dans les seconds des risques de givrage.

L'énergie éolienne est très utilisée pour alimenter en énergie électrique des sites très isolés dont les besoins énergétiques sont réduits,

La prospection des sites possibles constitue donc le premier travail à effectuer pour juger la possibilité d'utiliser le vent. Des relevés météorologiques complets sur les sites présumés doivent être effectués au moins pendant une année. Non seulement, il faut connaître la vitesse moyenne mais aussi la quantité d'énergie annuelle. Pour cela, des anémomètres spéciaux totalisateurs de l'énergie par mètre carré ont été mis au point à une hauteur de 10 m (hauteur adoptée par la Météorologie nationale). Les vents les plus intéressants, qui donnent le maximum d'énergie annuelle, sont les vents réguliers, ayant une vitesse moyenne de 3 à 8 m/s, voire jusqu'à 10 m/s. il faut éliminer les sites soumis à des variations très brutales de la vitesse du vent.

Les constructeurs, en vue de la conquête des mers, planchent sur des machines de plusieurs mégawatts. En effet, installer des fermes de grande puissance à quelques kilomètres des côtes, où les ressources en vent sont bien plus élevées qu'à terre, permettrait de réduire encore le coût de l'électricité. De plus, l'impact visuel sera atténué.

Une haie joue le rôle de brise-vent ; il en est de même des rideaux d'arbres ; ces obstacles s'avèrent défavorables à l'implantation des éoliennes de faible hauteur.

Des phénomènes cycliques apparaissent avec des périodes qui peuvent être de l'ordre de la dizaine de minutes, de quelques heures, de plusieurs jours ou de la durée des saisons. La connaissance de la fréquence de ces manifestations s'avère utile pour la sécurité des machines. Certaines régions ont la réputation de voir naître ou de voir passer un ou plusieurs cyclones par an, ou encore des tempêtes ou des tornades. De ce fait, les pays à riche implantation de stations météorologiques édictent des règles destinées à mieux cerner les hypothèses de calcul pour donner aux constructions un degré de sécurité accrue, [16].

2.3 Constituants d'une éolienne

2.3.1 Système mécanique

2.3.1.1 Le support

Les pylônes (mâts) peuvent être réalisés en acier ou en béton armé. Ils peuvent être autoporteurs et auto résistants ou haubanés. Si l'haubanage permet de réduire les dimensions du mât, par contre il pénalise l'emprise au sol. Pour limiter l'occupation au sol, le support age de plusieurs éoliennes par une seule structure est envisagée ; dans ce cas, les pylônes constitués de structures métalliques en treillis sont intéressants. Actuellement les mats en caisson, souvent en acier et fortement ancrés au sol, sont très répandus pour les éoliennes de forte puissance, [17].

La hauteur des Pylônes Sur les terrains non accidentés, la vitesse du vent augmente de 12% chaque fois que la distance entre le rotor de l'éolienne et la surface du terrain est doublée, la figure 2.3 représente la puissance des éoliennes en fonction de la hauteur.

Figure 2.3 : Puissance des éoliennes en fonction de la hauteur et du diamètre [17].

2.3.1.2 Orientation - Gouvernail - Pales

Deux solutions sont encore en concurrence : l'éolienne à rotor face au vent et l'éolienne à hélice sous le vent.

L'éolienne à rotor face au vent nécessite soit une dérive, soit une orientation actionnée par un servomoteur recevant des informations et commandes de la part d'une girouette.

Les capteurs à axe horizontal doivent toujours être orientés pour faire face au vent.

Les systèmes les plus simples sont ceux qui laissent l'hélice sous le vent. Le capteur, placé à l'amont du support, nécessite une gouverne mais soustrait les pales au sillage de ce support aigé. Par contre s'il est placé en aval, la gouverne n'existe plus et les efforts de manoeuvre sont plus faibles. Cette dernière disposition est donc plus simple et donne une stabilité supérieure. Il est cependant utile, dans tous les cas, de monter un amortisseur.

- **Les pales**

Les pales sont une partie très importante des éoliennes. De leur nature dépendront le bon fonctionnement et la durée de vie de la machine ainsi que le rendement du moteur éolien. Plusieurs éléments caractérisent ces pales :

- la longueur
- la largeur
- le profil
- les matériaux
- le nombre

Parmi ces éléments, certains sont déterminés par les hypothèses de calcul, puissance et couple et d'autres sont choisis en fonction de critères tel que :
coûts, résistance au climat.

- la longueur

Le diamètre de l'hélice est fonction de la puissance désirée. La détermination de ce diamètre fixe aussi la fréquence de rotation maximum, que l'hélice ne devra pas dépasser pour limiter les contraintes en bout (morceau) de pales dues à la force centrifuge. Il est essentiel de prendre en

compte le travail en fatigue des pales et les risques de vibrations, surtout pour les très longues pales.

Pour les roues à marche lente, ayant une inertie importante, le diamètre reste limité à 8 m à cause de leur comportement lors de rafales de vent.

Pour les roues à marche rapide, la longueur des pales peut être grande, supérieure à 30 m. La figure 2.4, représente le diamètre de l'hélice en fonction de la puissance.

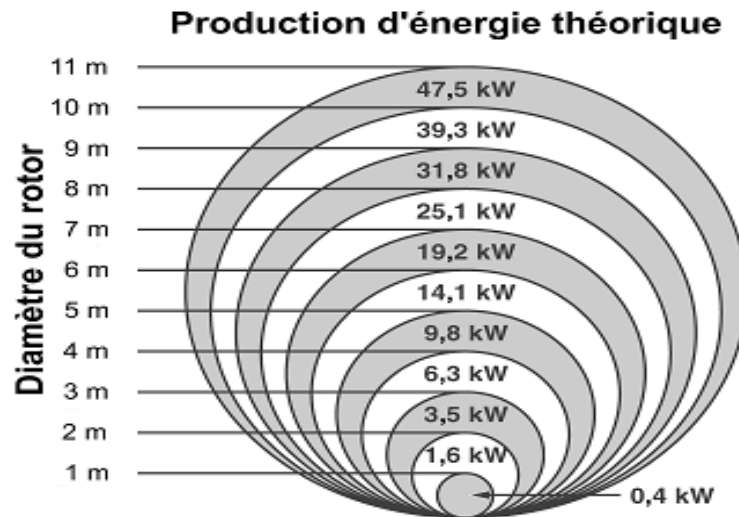


Figure 2.4 : diamètre de l'hélice en fonction de la puissance [17].

la largeur

La largeur des pales intervient pour le couple de démarrage qui sera d'autant meilleur que la pale sera plus large. Mais pour obtenir des vitesses de rotation élevées, on préférera des pales fines et légères. Le résultat sera donc un compromis.

le profil aérodynamique

Un profil aérodynamique, c'est la forme que possède une pale vue en coupe, comme illustré sur la figure 2.5, [4]

figure 2.5: aérodynamique

L'arête B du profil constitue le bord de fuite et les points du profil les plus éloignés de B constituent le bord d'attaque.

- La droite AB est la corde du profil.
- La distance AB est la largeur l du profil.
- L'angle d'incidence i est l'angle formé par la corde du profil et la direction du vent relatif W .
- Le profil est choisi en fonction du couple désiré.

Les fabricants utilisent deux types de profils :

- Profil traditionnel ressemblant à celui d'une aile d'avion vue en coupe: courbé sur un côté et plus ou moins plat sur l'autre.
- Profil cambré se caractérisant par le fait que ces deux côtés suivent une ligne plus ou moins parallèle.
- les matériaux

Les matériaux utilisés pour la réalisation des pales sont donc essentiels et doivent répondre à plusieurs exigences : ils doivent être assez légers, résistants à la fatigue mécanique, à l'érosion (dégradation) et à la corrosion, et de mise en oeuvre ou d'usinage simple.

On rencontre plusieurs types de matériaux :

Le bois : il est simple, léger, facile à travailler et il résiste bien à la fatigue mais il est sensible à l'érosion, peut se déformer et est réservé pour des pales assez petites. Le lamellé-collé : c'est un matériau composite constitué d'une accumulation de lamelles de bois collées ensemble. Il est possible de réaliser des pales jusqu'à 5 à 6 m de longueur ayant une bonne tenue en fatigue.

Les alliages d'aluminium pour des pales allant principalement jusqu'à 20 m de longueur.

Les matériaux composites : leur intérêt est de permettre la réalisation de toutes les formes et dimensions, ainsi que d'obtenir les caractéristiques mécaniques exactes recherchées : pale vrillée, corde évolutive, changement de profil.

le nombre

Les ingénieurs évitent de construire de grandes éoliennes avec un nombre pair de pales pour des raisons de stabilité. La plupart des éoliennes sont tripales, mais il existe aussi des éoliennes bipales et des éoliennes monopales. Mais la question qui se pose, pourquoi utiliser une éolienne à tripale au lieu de deux pales ou d'une pale, malgré que la théorie aérodynamique des pales nous dise que plus le nombre est réduit, plus grande est l'efficacité de conversion du rotor, donc l'idéal

serait de ne monter qu'une seule pale.

Voici pourquoi:

Le rotor et le générateur d'une éolienne sont montés sur la tour de manière à suivre continuellement le changement de direction du vent. Dans le cas des éoliennes à deux pales, on observe des vibrations cycliques importantes lorsque le rotor cherche à suivre le vent. Ces vibrations se répercutent sur toutes les composantes mécaniques de l'éolienne, elles sont créées par le changement cyclique de la position des pales à chaque tour. Quand les pales sont à la verticale, elles n'opposent qu'une faible résistance au changement d'orientation de la nacelle mais, à l'horizontale, elles opposent une résistance maximale. Il en résulte un mouvement d'orientation saccadé du système, à une fréquence double de la vitesse de rotation. L'utilisation d'un rotor à trois pales permet d'éliminer ce problème. Chacune a des avantages et des inconvénients qui sont regroupés dans le tableau 2.1.

Nombre de pales	Avantages	Inconvénients
Bipales	<ul style="list-style-type: none"> • Grande fréquence de rotation permettant d'obtenir un rendement optimale par rapport à la limite de Betz • Machine très simple ,en particulier pour le système de régulation lorsqu'il existe • Machine plus légère et multiplicateur éventuel plus petit • Ensemble moins coûteux 	<ul style="list-style-type: none"> • . sensibles aux vibrations • légèrement plus bruyante ,car la fréquence de rotation et plus élevée
Tripales	<ul style="list-style-type: none"> • . Moins sensible aux vibrations • . Couple de démarrage plus élevé 	<ul style="list-style-type: none"> • Fréquence de rotation plus faible et donc rendement mois bon • Machine plus lourde et plus compliquée surtout au niveau du système de régulation

Tableau 2.1 :Avantages et inconvénients des rotors à bipales et tripales

2.3.1.3 Multiplicateur

Les rotors dont le diamètre est supérieur à 5 m ont des vitesses de rotation trop faibles pour pouvoir entraîner directement un alternateur classique. Il est donc indispensable pour ces machines d'interposer entre l'aéromoteur et l'alternateur un multiplicateur. 3 types de multiplicateurs peuvent être utilisés avec les aéromoteurs :

- Le plus simple est le multiplicateur à engrenages à un ou plusieurs trains de roues dentées cylindriques, d'une réalisation économique il est tout de même encombrant pour un rapport de multiplication élevé.
- L'utilisation de trains planétaires permet de réaliser des multiplications élevées sous un encombrement réduit. Leur utilisation se généralise, cette technique permet de réaliser des rapports de multiplication élevés sous un encombrement réduit et avec un bon rendement de transmission. Les axes d'entrée et de sortie sont colinéaires voire coaxiaux.
- Le réducteur à couple conique permet une disposition de l'arbre de sortie perpendiculaire à l'arbre d'entrée, [17].

2.3.2 Système électrique

2.3.2.1 Génératrice

La génératrice électrique transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. Il existe différents types de génératrices:

Génératrice asynchrones

Les machines asynchrones sont constituées d'un stator et d'un rotor séparés par un entrefer d'épaisseur constante.

- Le stator comporte un circuit magnétique et un enroulement polyphasé, le plus souvent triphasé, à P paires de pôles, parcouru par des courants polyphasés.
- Le rotor se compose également d'un circuit magnétique et d'un enroulement polyphasé à p paires de pôles. Il existe deux types de rotors : les rotors bobinés et les rotors à cage, [6]

Génératrices synchrones (alternateurs)

La génératrice synchrone n'a pas besoin de magnétisation extérieure pour créer son champ magnétique. La machine comporte de deux parties

- L'inducteur qui crée le champ magnétique dans l'entrefer est mobile. C'est le rotor entraîné par l'aéromoteur. Il s'agit soit d'un:

- Rotor bobiné alimenté par deux collecteurs: il utilise un enroulement de cuivre autour d'un noyau en fer pour créer le champ magnétique.
- Rotor constitué par un aimant permanent, ce qui supprime balais et collecteurs. Les aimants créent un champ magnétique permanent et constant, ils produisent un courant et une tension de fréquence proportionnelle à la vitesse de rotation (qui varie avec le vent).
- L'induit (stator) dans lequel on récupère l'énergie, solidaire de la carcasse, est relié à l'utilisation. Il peut être monophasé ou triphasé. Le triphasé permet d'obtenir une tension alternative presque sinusoïdale.

La génératrice synchrone étant indépendante du réseau, elle fournit une fréquence variable en fonction de la vitesse de rotation, donc de la vitesse du vent, [18].

Génératrice à courant continu

La machine comporte deux parties:

- Le circuit magnétique (bobine magnétisante) dont le but est de créer le champ dans l'entrefer: c'est l'inducteur.

- L'enroulement d'induit dans lequel on récupère l'énergie électrique produite par la rotation du rotor entraîné par l'aéromoteur, [18].

2.3.2.2 Choix de la génératrice

Le choix de la génératrice entraînée par le rotor s'effectue suivant la puissance recherchée et le type de couplage. Pour des raisons de facilité de transport, de transformation et de rendement, l'électricité est utilisée en courant alternatif.

Génératrice à courant continu

Seules des installations de petites puissances (< 1 kW) peuvent nécessiter l'utilisation d'une génératrice à courant continu.

Génératrice à courant alternatif

Sur les grandes éoliennes (supérieures de 100 à 150 kW), la tension générée par l'éolienne est le plus souvent un courant alternatif triphasé de 690 V (CA).

Le courant est ensuite conduit à travers un transformateur situé juste à côté de l'éolienne ou bien à l'intérieur) pour augmenter la tension à approximativement 10.000 à 30.000 V, selon le standard du réseau électrique local.

Pour un couplage au réseau, on peut utiliser un alternateur; génératrice synchrone ou une génératrice asynchrone.

2.4 Différents types de capteurs éoliens

On classifie les capteurs éoliens par l'orientation de leur axe de rotation par rapport à la direction du vent. On distingue alors:

Capteurs à axe horizontal .

Capteurs à axe vertical .

2.4.1 Les capteurs à axe horizontal

Ce sont les machines actuellement les plus répandues car leur rendement est supérieur à celui de toutes les autres machines. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales, ou des hélices multiples pour le pompage de l'eau.

On peut distinguer comme le montre la figure 2.6, les capteurs éoliens dont l'hélice est en amont par rapport au vent, « hélice au vent », et ceux dont l'hélice est en aval par rapport au vent, « hélice sous le vent » :

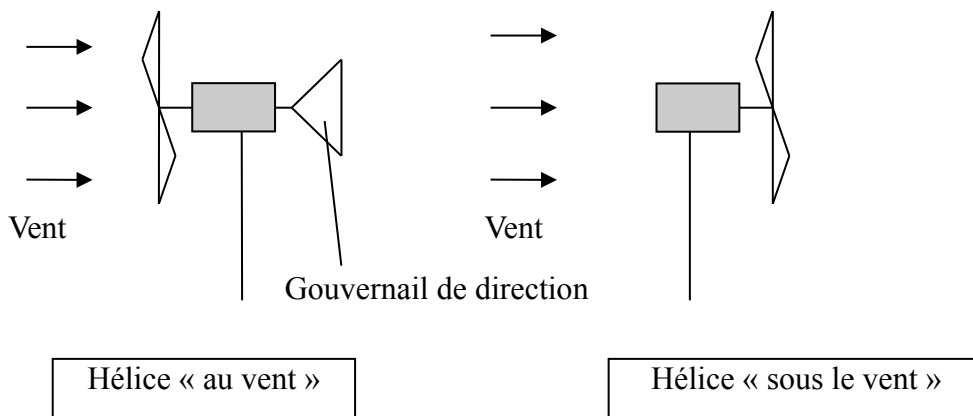


Figure 2.6: Les capteurs à axe horizontal

2.4.2 Les capteurs à axe vertical

Les principaux capteurs à axe vertical sont le rotor de Savonius, le rotor de Darrieus et le capteur à ailes battantes. Il existe également les machines à traînée différentielle comme le moulinet, les machines à écran et les machines à clapets battants.

2.4.2.1 Rotor de Savonius

Il est constitué de deux demi cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre. L'écoulement interne favorise les caractéristiques de performance de la machine. Le rotor de Savonius est caractérisé par un grand couple de démarrage. A titre d'exemple, des machines de plusieurs kilowatts ont été réalisées pour assurer le pompage de l'eau dans les pays du Sahel; elles démarrent à des vitesses de vent faible, voisines de 2 à 3 m/s. Ces systèmes présentent cependant beaucoup plus d'inconvénients que d'avantages dans les réalisations actuelles, en particulier ils nécessitent comme les systèmes à axe horizontal parallèle « au vent » un dispositif d'orientation. La récupération de l'énergie produite est en général beaucoup plus compliquée et se traduit souvent par une perte sensible du rendement global.

2.4.2.2 Rotor de Darrieus

Le principe du rotor ou anémone de Darrieus inventé par l'académicien français Darrieus au cours des années 1920-1935 repose sur l'effet de portance d'un profil soumis à l'action d'un vent relatif. Il existe quatre sortes de rotors de Darrieus: le rotor cylindrique, le rotor tronconique, le rotor à variation cyclique et le rotor parabolique.

Toutes ces machines ont besoin d'être haubanées, c'est-à-dire soutenues par des câbles ou des cordages. Le comportement dynamique de la machine doit tenir compte des modes propres de vibration de tous les organes structuraux, y compris celle des haubans.

2.4.2.3 Moulinet

Qui est une machine à traînée différentielle est constitué de plusieurs demi sphères ou de coquilles cylindriques (augets) montées sur des bras reliés à un axe vertical tournant.

La rotation est assurée par la traînée aérodynamique qui s'exerce différemment sur l'aube qui remonte face au vent et sur celle qui s'efface au vent. Les vents de faible vitesse, 1 à 2 m/s, suffisent pour assurer leur démarrage.

Cependant, ce type de capteur éolien ne convient pas pour alimenter un générateur électrique car il ne produit qu'une très faible puissance,[19].

La figure 2.7, présente des exemples d'éoliennes: (a) éolienne de type Savonius Rotor, (b) éolienne de type Darrieus.

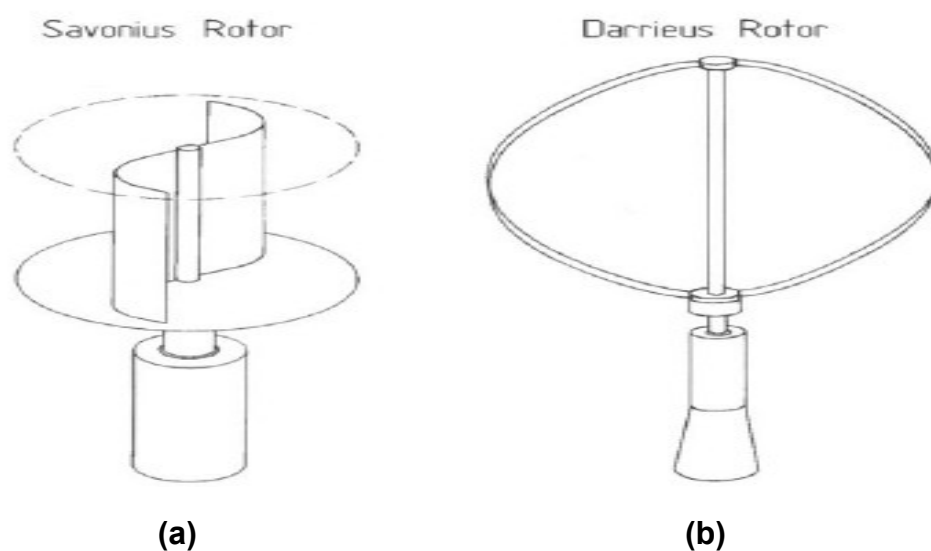


Figure 2.7: Exemples des éoliennes à axe vertical,[19].

2.5 Principe de fonctionnement d'une éolienne

La figure 2.8, illustre les principaux organes d'une éolienne .

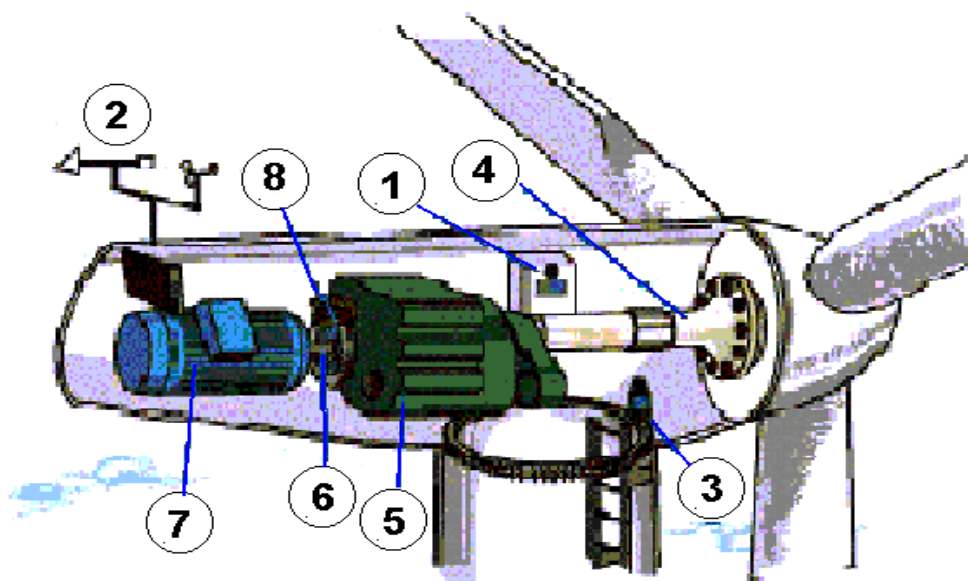


Figure 2.8 : Schéma de principe du fonctionnement d'une éolienne [20]

Lorsque le vent devient suffisant (3 à 5 m/s), l'automate (1), renseigné par l'anémomètre et la girouette (2) fixés au sommet de la nacelle, commande au moteur d'orientation (3) de placer l'éolienne face au vent.

Le vent entraîne les pales qui font tourner un arbre lent (4). Le multiplicateur (5) augmente la vitesse de rotation et imprime cette accélération à l'arbre rapide (6). Celui-ci transmet le mouvement rotatif au générateur (7) qui produit l'électricité.

Le courant ainsi produit descend au sol par des câbles situés dans le fût (bois) de l'éolienne. Il est alors transformé pour être injecté au réseau électrique existant.

Les éoliennes de puissance ne fonctionnent et ne produisent pas en permanence. Elles ont besoin d'une vitesse de vent minimale pour commencer à produire de l'électricité. Inversement, elles se freinent puis s'arrêtent automatiquement lorsque la vitesse du vent est trop élevée (environ 100 km/h). Ainsi, les aérogénérateurs ne produisent de l'électricité qu'entre 2 vitesses de vent appelées vitesse de démarrage et vitesse de coupure. Pour freiner la rotation des éoliennes, on utilise souvent le principe de pales à pas variable ou pitch control : les pales sont mobiles autour de leur axe longitudinal et s'orientent automatiquement de façon à diminuer la portance au vent.

Lorsque la vitesse du vent est trop importante et que ce mécanisme ne suffit plus à freiner le mouvement rotatif, l'éolienne se place perpendiculairement au vent (on dit qu'elle se met en drapeau, comme les voiles d'un bateau). Le rotor devient ainsi immobile.

Un autre système de régulation, appelé stalle control est également parfois utilisé : c'est alors le profil aérodynamique de la pale qui permet à l'éolienne de réguler.

Les éoliennes disposent en outre d'un frein mécanique (8), dit frein d'urgence. Celui-ci, placé sur l'arbre rapide, permet de suppléer le freinage par les pales en cas de défaillance, ou bien de maintenir l'éolienne en position arrêtée en période de maintenance, [20].

2.5.1 Types d'éoliennes

- Micro éolienne : c'est une éolienne de puissance inférieure à 200 W.
- Mini éolien : c'est une éolienne de puissance entre 200 W à 600W.
- Moyenne éolienne : c'est une éolienne de puissance entre 1000 W à 3000W.
- Grosse éolienne : c'est une éolienne de puissance supérieure à 3500W.

2.5.2 Les raisons pour choisir une éolienne de faible puissance

Il arrive que le réseau électrique local soit trop faible pour supporter la production électrique d'une grande éolienne. C'est souvent le cas dans les parties les plus extérieures du réseau où la densité de la population et les besoins en électricité sont très bas.

La production d'électricité est moins fluctuante dans un parc éolien composé de plusieurs petites éoliennes, étant donné que les variations du vent sont aléatoires, ayant donc tendance à s'annuler. Et en plus, comme déjà mentionné, le choix d'éoliennes plutôt petites peut se révéler avantageux dans un réseau électrique faible.

Les coûts liés à l'usage de très grandes grues et à la construction de chemins suffisamment robustes pour supporter le transport des composants de l'éolienne constituent un autre facteur qui, dans certains endroits, rend plus économique le choix de petites éoliennes. Avec plusieurs éoliennes d'une moindre puissance, on assure la répartition du risque en cas de défaillance temporaire d'une éolienne (p.ex. par suite d'une foudre).

Des considérations esthétiques du paysage peuvent parfois dicter le choix d'éoliennes plus petites. Cependant, il faut savoir, que la vitesse de rotation d'un grand rotor est en général beaucoup moins rapide que celles d'un petit, ce qui a pour résultat qu'une seule grande éolienne attire souvent moins l'attention que plusieurs petites, [21].



Figure 2.9 : Exemple d'une éolienne de faible puissance, [21]

2.5.3 Démarrage (et coupure) de l'éolienne

La plupart des systèmes de commande ont été programmés à laisser l'éolienne tourner à vide sans connexion au réseau lorsque la vitesse du vent est faible. (Si elle était connectée au réseau à des vitesses de vent faibles, elle fonctionnerait en fait comme un moteur). Lorsque le vent est assez fort pour faire tourner le rotor et la génératrice à leurs vitesses nominales, il est important que la génératrice de l'éolienne soit connectée au réseau électrique en temps utile. Sinon il n'y

aura que la résistance mécanique du multiplicateur et de la génératrice pour empêcher l'accélération - et éventuellement la survitesse - du rotor.

Une éolienne est munie de plusieurs dispositifs de sécurité, comprenant entre autres des freins de sécurité intégrés, (actionnés dans le cas où le démarrage de l'éolienne n'aura pas lieu correctement), [22].

2.6 Différentes applications de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est captée dans les rotors sous forme mécanique, c'est-à-dire sous la forme d'un couple dans un arbre en rotation. Du fait, le plus souvent, de l'irrégularité de cette énergie elle n'est pas utilisée sous cette forme mais convertie en énergie mécanique potentielle (pompage d'eau), en énergie thermique et souvent en énergie électrique, [20].

La vitesse de rotation du rotor est le paramètre le plus important dans la conversion de l'énergie mécanique, elle est généralement faible (quelques dizaines à une centaine de tours par minute), or les générateurs, les pompes rapides et les convertisseurs thermiques tournent à de grandes vitesses, ce qui nécessite un multiplicateur de vitesse.

2.6.1 Chauffage éolien

Parmi les besoins énergétiques susceptibles d'être satisfaits par l'emploi des éoliennes, le chauffage des locaux, qu'on a besoin en hiver où le vent souffle fréquemment.

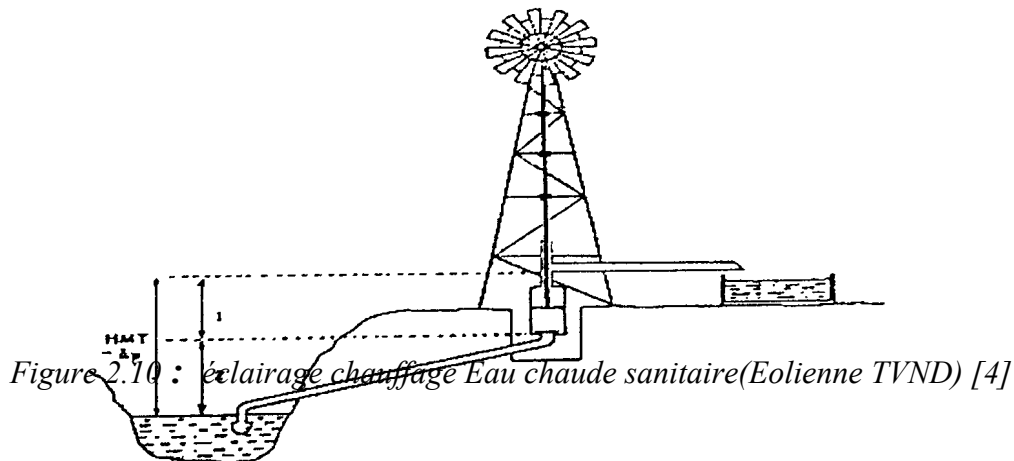
Le chauffage éolien peut être réalisé de diverses manières:

- Soit directement à l'aide de résistances électriques formant des convecteurs ou incorporé à la structure même du bâtiment. Dans ce cas, l'énergie électrique produite par l'éolienne n'est pas stockée et est utilisée au fur et à mesure de sa production, [4].
- Soit en chauffant un fluide caloporteur, qui sera généralement de l'eau. Ce chauffage se fera: soit par résistance électrique, utilisant ou non un circuit de distribution existant; soit à l'aide d'un système mécano thermique, l'énergie éolienne étant transformée directement en chaleur par frottement mécanique d'un fluide caloporteur; l'énergie calorifique est ensuite transportée par des tuyauteries calorifiques vers le bâtiment à chauffer. a soit par l'intermédiaire d'un système de conversion directe en chaleur par courant de Foucault. Un rotor multipolaire à aimants permanents engendre des courants de Foucault dans les parois métalliques d'un échangeur de chaleur où l'on introduit de l'eau froide qui, après un parcours hélicoïdale au contact des parois, ressort à une température que l'on peut asservir en agissant sur le débit, [4] ; a soit par l'utilisation d'une pompe à chaleur couplée directement ou non à

l'éolienne.

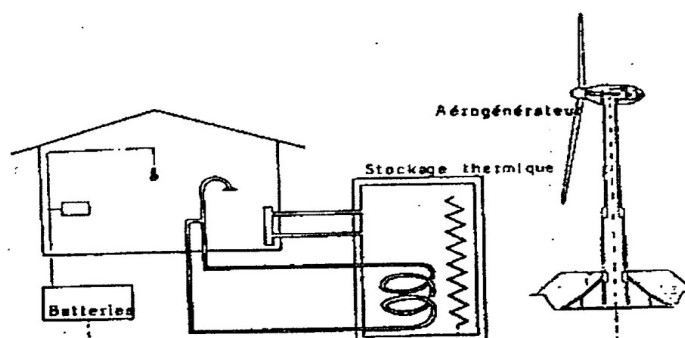
La plus grande éolienne de chauffage est l'éolienne de TVND (au Danemark) : c'est une éolienne à trois pales en résine époxy armée de fibre de verre, rapide de vitesse de rotation maximale 42 tr/min. La génératrice est un alternateur d'une puissance de 2000 kW.

La figure 2.10 illustre le schéma de principe d'un chauffage éolien



2.6.2 Pompage de l'eau

L'utilisation des éoliennes pour le pompage de l'eau est une méthode traditionnelle. Les éoliennes multiples sont les plus courantes pour ce type d'utilisation mais le pompage à l'aide d'éoliennes rapides présente certains avantages et tend à se développer dans les régions où les vents moyens et forts ont une fréquence suffisante, [4].



1 : hauteur de refoulement.

2 : hauteur d'aspiration.

Ce sont des éoliennes de 6 à 24 pales comme illustré sur la figure 2.1 elles démarrent pour des vents faibles de l'ordre de 2.5 à 3 mis. Son couple est maximum au démarrage et diminue lorsque la vitesse de rotation augmente.

La pompe est simple et permet une hauteur de refoulement importante.

Par contre, elle demande un couple assez élevé et surtout constant; sa vitesse est faible, [20]. La puissance d'une éolienne

de pompage dépend de :

- la hauteur géométrique d'aspiration.
- la hauteur géométrique de refoulement.
- et les pertes de charge.

L'éolienne peut être couplée soit à une pompe à piston, le mouvement de rotation de l'éolienne est transmis à cette pompe par un système bielle-manivelle logé dans la tête de l'éolienne. La tuyauterie d'aspiration et de refoulement est montée directement aux extrémités du corps de la

pompe; soit à une pompe à membrane. Selon le diamètre des éoliennes et le rendement des systèmes, on obtient une gamme très étendue de débits et de profondeurs de pompage. Les avantages de ces éoliennes sont leur simplicité de construction, leur robustesse et leur fiabilité.

2.6.3 Eoliennes rapides de pompage

Le principal inconvénient des éoliennes multiples est de posséder une régulation par tout ou rien. En effet, au delà de 10 mis (valeur nominale de la vitesse du vent la plus répandue pour les éoliennes multiples), le moteur éolien se place dans le lit du vent grâce à la palette de régulation et le dispositif ne pompe plus, [23]. On a donc pensé utiliser les éoliennes à hélice rapide pour le pompage, il existe deux types:

- Eoliennes rapides équipées de pompes à piston (Lubing) : ce sont des éoliennes à 3 ou 4 pales à régulation centrifuge, ce qui permet de continuer à pomper pour des vents de 33m/s. Elles sont équipées d'un réducteur entre l'hélice et le dispositif bielle-manivelle.
- Eoliennes rapides équipées de pompes centrifuges: ces pompes sont moins encombrantes et moins coûteuses, elles permettent une adaptation aux vitesses des éoliennes rapides à cause de leurs vitesses de rotation élevées. Le couplage de la pompe peut se faire soit mécaniquement par l'intermédiaire d'un multiplicateur, soit électriquement.

2.6.4 Production d'électricité

- Les éoliennes ou aérogénérateurs, sont principalement utilisées aujourd'hui pour la production de l'électricité. La rotation des pales exposées au vent fait tourner une génératrice
- qui produit de l'électricité
- Actuellement, l'énergie éolienne est la source d'énergie qui connaît l'expansion la plus rapide au monde, la quantité d'électricité produite par énergie éolienne était pratiquement équivalente à la production de 24 centrales nucléaires (24.000 MW), [24]. La Figure 2.12 illustre le schéma de principe d'un aérogénérateur.

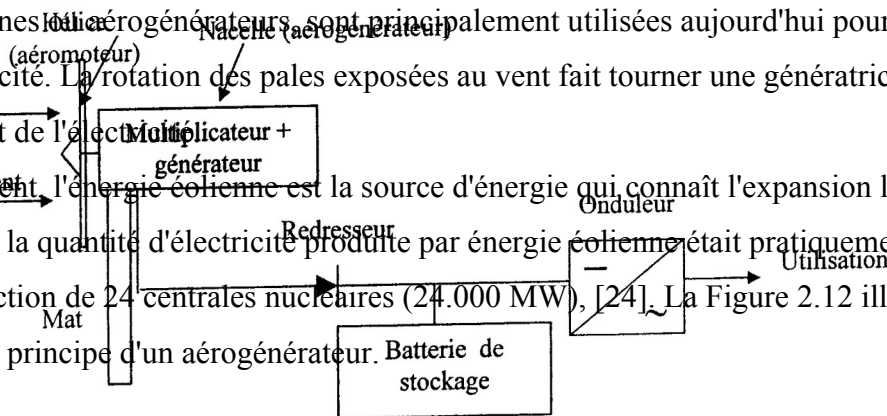


Figure 2.12 : schéma de principe d'un aérogénérateur

Un aérogénérateur est constitué par :

- Un aéromoteur à deux ou trois pales avec système de régulation permettant à l'hélice une vitesse de rotation stable à partir d'une certaine vitesse de vent, et éventuellement un système de sécurité destiné à arrêter la machine pour des vitesses très grandes, surtout en cas de tempête.
- Un générateur électrique qui peut être soit accouplé à l'aéromoteur, soit entraîné par un multiplicateur.
- Ce générateur pourra être soit une dynamo fournissant un courant continu, soit un alternateur.
- Un pivot d'orientation qui permet à la machine de présenter l'hélice au vent quelle que soit sa

direction .

- Un carter qui protège et relie l'ensemble des pièces .
- Un gouvernail, dans le cas où l'hélice fonctionnerait au vent.

Selon sa taille, l'installation peut alimenter un utilisateur isolé, on parle de «production décentralisée », on utilise en général des machines de petites puissance jusqu'à 25 kW), ou devenir une véritable centrale de production d'électricité, on parle dans ce dernier cas de «fermes éoliennes », ce sont de grosses installations dont la puissance peut atteindre 1500 kW, [10].

2.7 Eoliennes dans le monde

Il y a des milliers d'éoliennes dans le monde et on ignore combien de petites éoliennes fonctionnent car certaines sont réalisées artisanalement.

Plus de 35000 grandes éoliennes sont réparties à travers le monde et elles produisent plus de 8.000 MW. Voici un aperçu général.

_ En Afrique : des éoliennes pour l'alimentation des villages en eau ont été installées au Sénégal. La Mauritanie a un grand potentiel du vent. L'Egypte et le Maroc ont des besoins énormes en énergie et de très bonnes ressources éoliennes et des parcs éoliens s'implantent.

-En Algérie : les recherches sont encore en cours.

-En France : elles se multiplient surtout dans les régions les plus exposées au vent, et on prévoit en installer en mer.

-Au Canada : un projet très important s'est implanté au Québec.

_ En Europe : forte croissance dans les pays du nord (Allemagne, Danemark, Angleterre, Espagne).

-Au Etats –Unis : la plus grande population d'éoliennes s'y trouvait jusqu'ici (17000) avec une forte concentration en Californie.

-En Inde : c'est un grand marché, deux usines de fabrication sous licence sont en production ..

-Au Japon : peu développé jusqu'ici.

-En Chine et reste de l'Asie : c'est le marché le plus gigantesque, mais le décollage est lent, les risques de tremblement limitent le potentiel d'installation.

-En Amérique du Sud : plusieurs ont été installées, il y a des vingtaines d'années, surtout en Argentine.

2.8 Energie éolienne en Algérie

Les travaux de recherche pour la détermination du potentiel énergétique éolien sont en cours. Ceux-ci permettront l'établissement d'un ATLAS éolien Algérien et de localiser les régions destinées à recevoir les applications des systèmes de conversion éolienne.

Ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau particulièrement sur les Hauts Plateaux et la Zone Côtière.

Rappelons néanmoins que les premiers résultats montrent que l'Algérie à un régime de vents modérés 2 à 6 m/s); voir carte des vents, figure 2.13, [5].

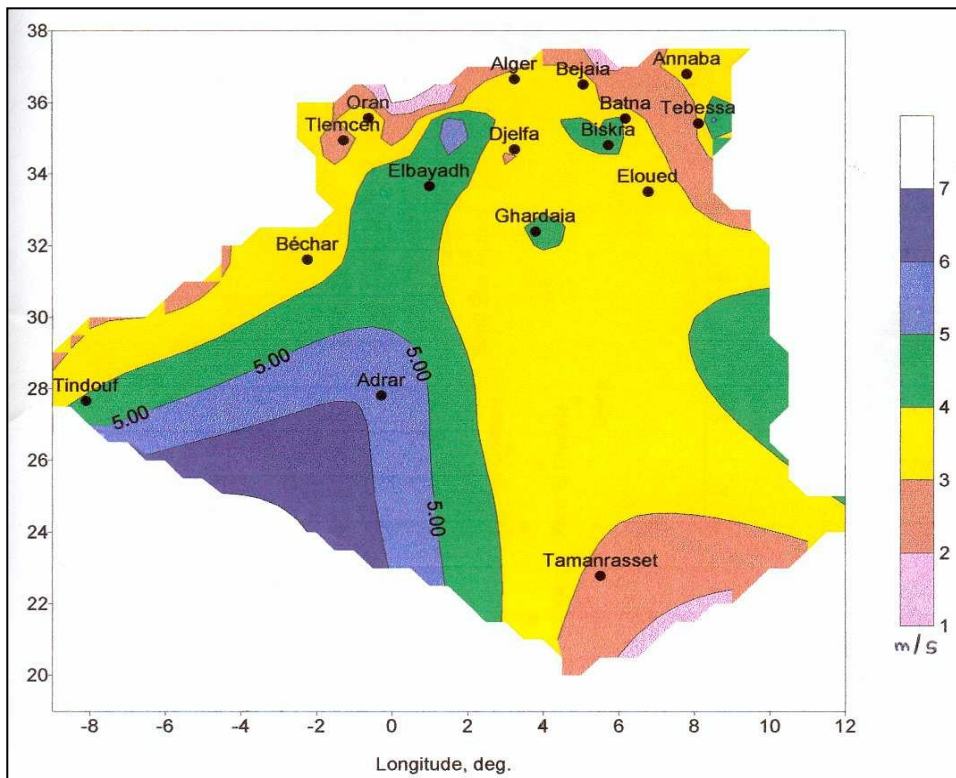


Figure 2.13: Carte préliminaire des vents de l'Algérie Vitesse du vent en (m/s)

2.9 Conclusion

L'énergie du vent peut être transformée en énergie mécanique ou en électricité par des turbines éoliennes.

Plusieurs modèles de turbines ont été passés sur revue, des modèles à axes verticaux et à axes horizontaux. La turbine la plus populaire est celle à axe horizontale à trois pales qui fleurit depuis les années 80,

La taille des turbines augmente sans cesse. Les modèles commerciaux actuels offrent des puissances nominales allant jusque à 2 MW et les recherches en cours s'intéressent à des turbines pouvant aller jusqu'à 6 MW pour des applications en mer. Les éoliennes ont fait beaucoup de progrès en aérodynamique et sont de plus en plus silencieuses.

Vue l'importance de l'énergie éolienne on s'intéressera dans le chapitre trois à la Modélisation, identification, simulation et régulation du système éolien.

Chapitre trios

Etude de conception d'une éolienne

3.1 Introduction

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique et d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple /vitesse de la turbine pour parvenir à cet objectif, idéalement, une éolienne doit comporter :

- un système qui permet de la contrôler mécaniquement (orientation des pales de l'éolienne, orientation de la nacelle)

Dans le présent chapitre nous allons élaborer une étude pour la conception d'un prototype de mini centrale éolienne

3.2 Stratégies de fonctionnement d'une éolienne

3.2.1 Bilan des forces sur une pale

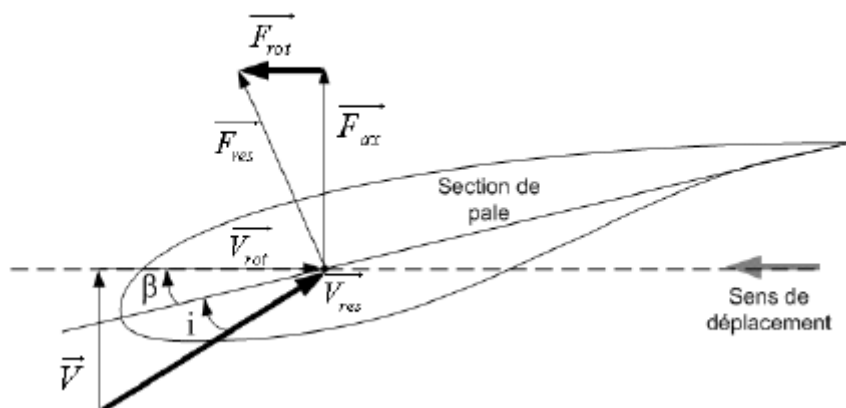


Figure 3.1 : Bilan des forces sur une pale.

La figure 3.1 représente la section longitudinale d'une pale d'aérogénérateur [26]. La vitesse du vent arrivant face à cette pale, est représenté par la vecteur \vec{V} . le vecteur \vec{V}_{rot} représenté la composante de vent due à la rotation de l' aérogénérateur. La résultante de ces deux vecteurs est appelée \vec{V}_{res} . l'action du vent sur la pale produit une force \vec{F}_{res} qui se décompose en une poussée axiale \vec{F}_{ax} directement compensée par la résistance mécanique du mat et une poussée en direction de la rotation \vec{F}_{rot} qui produit effectivement le déplacement. Chaque turbine éolienne est ainsi dimensionnée pour que cette force atteigne sa valeur nominale donnée. Lorsque la vitesse de vent devient trop élevée ou si la génératrice nécessite une vitesse de rotation fixe, la puissance extraite par l' éolienne doit être annulée ou limitée à sa valeur nominale.

3.3 Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne

3.3.1 Système à décrochage aérodynamique "stall" [27]

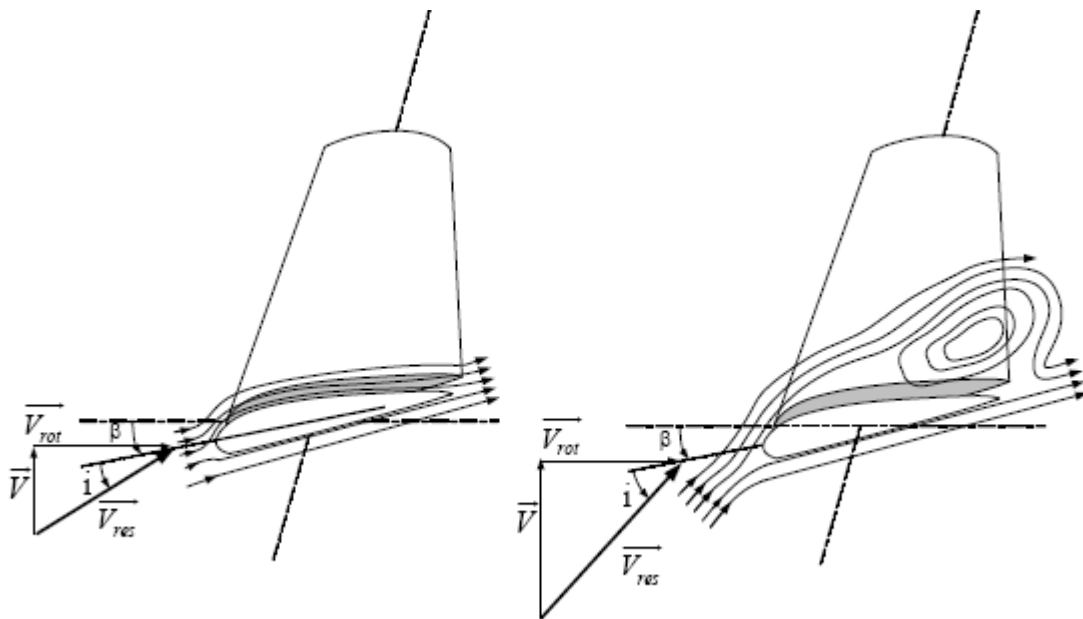


Figure 3.2 : Flux d'air sur un profil de pale " stall "

La plupart des éoliennes connectées au réseau électrique nécessitent une vitesse de rotation fixe pour des raisons de cohérence de fréquence avec le réseau. Le système de limitation de vitesse le plus simple et le moins coûteux est un système de limitation naturelle (intrinsèque à la forme de pale) dit "stall". Il utilise le phénomène de décrochage aérodynamique. Lorsque l'angle d'incidence i devient important, c'est-à-dire lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale V_n , l'aspiration créée par le profil de la pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface de la pale (figure 3.2) et par conséquent une baisse du coefficient de puissance. Ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation.

Ce système est simple et relativement fiable mais il manque de précision car il dépend de la masse volumique de l'air et de la rugosité des pales donc de leur état de propreté. Il peut, dans certains cas, être amélioré en autorisant une légère rotation de la pale sur elle-même (système "stall actif")

permettant ainsi de maximiser l'énergie captée pour les faibles vitesses de vent. Pour les fortes vitesses de vent, la pale est inclinée de façon à diminuer l'angle de calage β et renforcer ainsi l'effet "stall" de la pale. La répercussion des variations de vitesse de vent sur le couple mécanique fournie par l'éolienne est ainsi moins importante .

3.3.2 Système d'orientation des pales "pitch" [27]

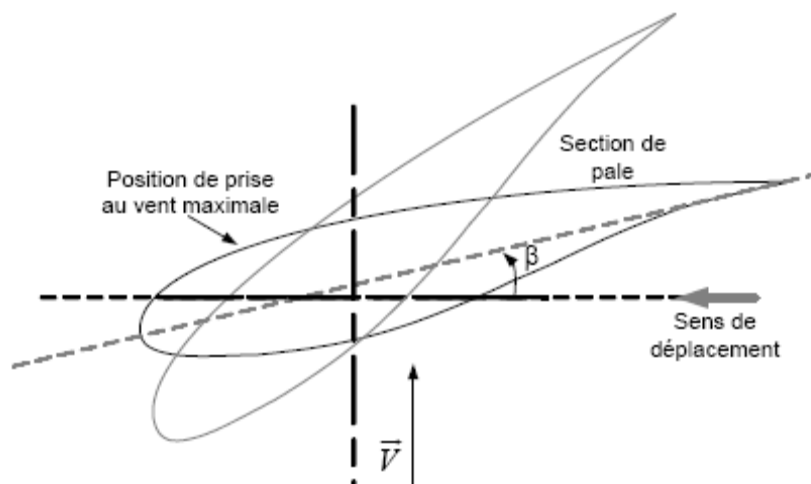


Figure3.3: Variation de l'angle de calage d'une pale.

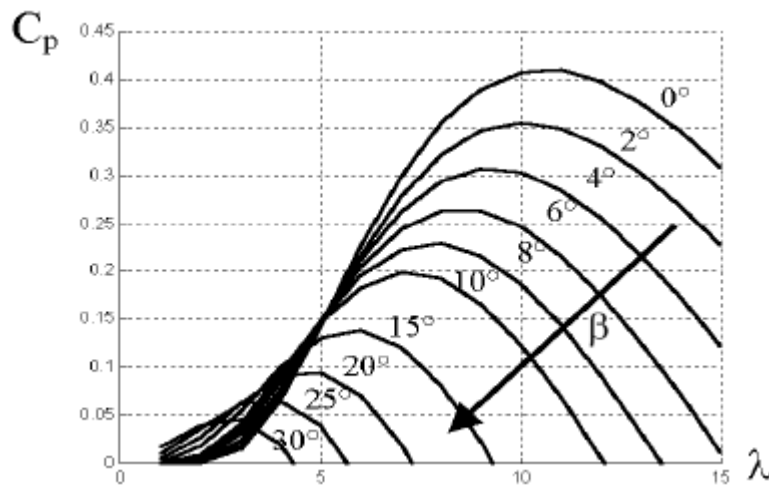


Figure 3.4 : Influence de l'angle de calage sur le coefficient de couple

3.4 Résultat de calcul dû de la Distribution de Weibull [27]

De nos jours, la distribution de Weibull est couramment utilisée pour ajuster les données expérimentales du vent avec une très bonne précision . Supposons que pour un site donné et pour un secteur de direction donné moyen .

Après calcul, nous avons déterminé les valeurs de A et k ainsi que les vitesses moyennes du vent pour tous les mois et pendant l'année pour une hauteur expérimentale $h=10\text{m}$ ou: v , k et A sont respectivement la vitesse du vent (m/s), le facteur de forme (qui est sans dimension) et le facteur d'échelle (en mis). Les valeurs sont groupées dans le tableau 3.1 .

	A(m/s)	k	Vitesse moyenne du vent_(mis)
Janvier	3.03866000	1.1219	2.9136
Février	3.61400000	1.0891	3.4988
Mars	4.80991713	1.3547	4.4079
Avril	4.76940491	1.3018	4.4037
Mai	4.99809568	1.4199	4.5455
Juin	4.40156363	1.4246	4.0011
Juillet	4.22575890	1.4447	4.0274
août	3.91475797	1.3834	3.5748
Septembre	3.67999582	1.3532	3.373 1
Octobre	3.80730790	1.2724	3.5321
Novembre	2.84879224	1,1643	2.7016
Décembre	2,85256867	1,1224	2.7347
Année	3,87823824	1,2773	3.5950

Tableau 3.1 : les valeurs des paramètres de Weibull et de la vitesse moyenne du vent.

On remarque que la vitesse annuelle du vent pour le site de Ain amenas est 3.595 m/s, les mois d'hiver (Novembre, Décembre et Janvier) sont les mois ventés. La valeur minimale de la vitesse est pendant le mois de Novembre avec une valeur de 2.7m/s et la valeur maximale est pendant le mois de Mai avec une valeur de 4.5455 m/s. Pour les directions on remarque que la direction est la plus ventée, donc on doit orienter notre éolienne suivant cette direction.

Donc le site choisi est favorable pour l'implantation d'une éolienne. On définit alors les vitesses du vent comme suit :

- V_0 : valeur de vitesse pour laquelle le rotor de l'éolienne commence à tourner;
- V_f : valeur de vitesse pour laquelle le générateur commence à fournir de la puissance;
- V_n : valeur de vitesse pour laquelle la puissance nominale est atteinte;
- V_{hs} : valeur de vitesse pour laquelle la machine doit être arrêtée.

Les valeurs communes aux différents constructeurs sont les suivantes :

$V_0=3\text{m/s}$; $V_f=4.5\text{m/s}$; $V_1=13\text{m/s}$; $V_{hs}=25\text{m/s}$.

3.5 Influence de l'hauteur du pylône sur la puissance éolienne [6]

Après le calcul de la vitesse du vent mensuelle et annuelle et celui des puissances disponibles et récupérables, on peut dimensionner notre éolienne, en commençant par le système mécanique.

Le choix de la hauteur du pylône dépend de la nature du terrain au-dessus duquel se propage la masse d'air. Ces variations sont représentées par la relation suivante:

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^\alpha \quad (3.1)$$

Où: V_1 et V_2 représentent les vitesses de vent horizontales aux hauteurs h_1 et h_2 .

L'exposant α caractérise le terrain, il est compris entre 0.08 et 0.4, sa valeur augmente en fonction de la grandeur et de la densité surfacique des obstacles au sol.

Dans le tableau 3.2, on trouvera les valeurs prises par α pour les différents types de terrain partagés en 4 familles:

Nature du terrain	L'exposant α
Plat: glace, neige, mer, marécage, herbes courtes.	0.08 à 0.12
Peu accidenté (inégalité de faible amplitude) : champs et pâturage, culture.	0.13 à 0.16
Accidenté : bois, zones peu habitées.	0.20 à 0.23
Très accidenté : villes.	0.25 à 0.40

Tableau 3.2: Les valeurs de α suivant la nature du terrain.

Le site de Ain Amenas est classé dans la deuxième famille, on prendra alors $\alpha=0.13$. Donc

$$V(h) = V(10) \left(\frac{h}{10} \right)^\alpha \quad (3.2)$$

$V(h)$ représente la vitesse à la hauteur h considérée, et $V(10)$ la vitesse à la hauteur 10m. Donc la vitesse est proportionnelle à la hauteur du pylône.

Pour chaque valeur de h variant de 10m jusqu'à 100m, on calcule la vitesse correspondante. La variation de la vitesse en fonction des différentes hauteurs est représentée par la figure 3-5.

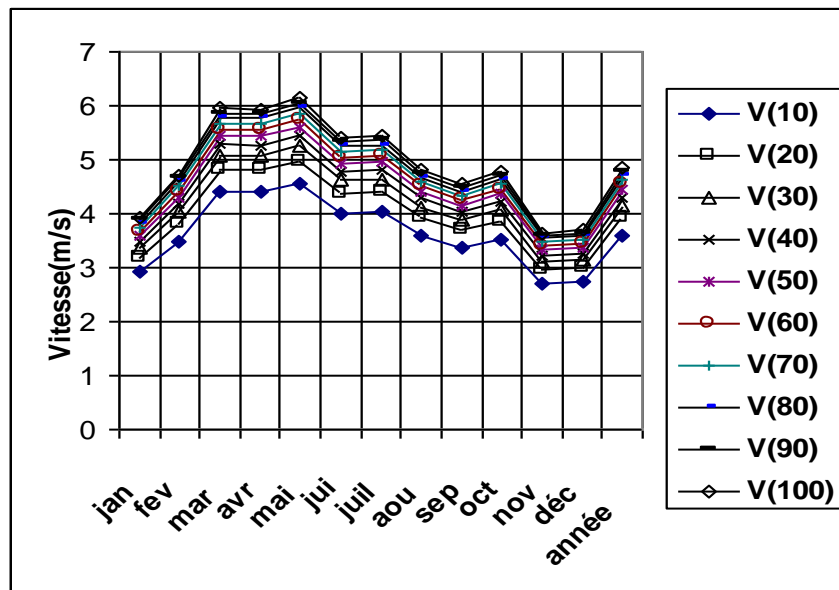


Figure3.5: Variation de la vitesse en fonction de la hauteur du mat.

3.6 Production d'énergie mécanique [27]

La puissance du vent (cinétique) ou puissance éolienne (disponibles) est définie de la manière suivante :

$$P_v = 1/2 \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (3.3)$$

La puissance mécanique P récupérable sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi:

$$P = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (3.4)$$

avec :

$$\lambda = \frac{\Omega_1 R}{V_1} \quad (3.5)$$

Ω_1 : vitesse de rotation avant multiplicateur et R : rayon de l'aérogénérateur.

ρ : la masse volumique de l'air.

C_p : coefficient de puissance présente un maxima de $16/27$ soit $0,59$. Chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse m , la puissance mécanique P récupérable sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par :

$$P = \frac{1}{2} C_p \left(\frac{\Omega_2 R}{m V_1} \right) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (3.6)$$

Avec Ω_2 : vitesse de rotation après multiplicateur.

Cette relation permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent (Figure 3-6) .

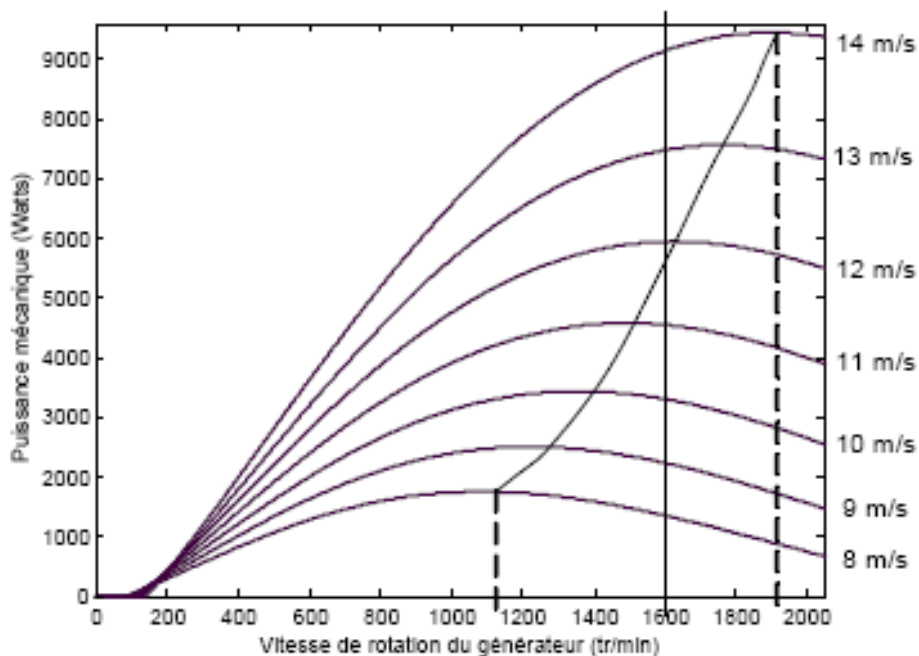


Figure 3.6 : Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné [27]

Au vu de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe (par exemple 1600 tr/min sur la Figure 3.6) les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités. Pour pouvoir optimiser le transfert de puissance et ainsi obtenir le maximum théorique pour chaque vitesse de vent, la machine devra pouvoir fonctionner entre 1100 et 1900 tr/min pour cet exemple.

3.7 Théorème de Betz

L'énergie récupérable est celle qu'il est possible de prélever de l'énergie cinétique du vent. Betz a montré que, pour une machine à axe horizontal, cette quantité avait une limite. Après démonstration, en prenant pour la masse volumique de l'air une valeur moyenne de $1,25 \text{ Kg/m}^3$, la puissance maximum pratiquement récupérable par un dispositif de surface S est égale à :

$$P = 0.37\pi\left(\frac{D}{2}\right)^2 V^3 \quad (3.7)$$

C'est la limite de Betz [1].

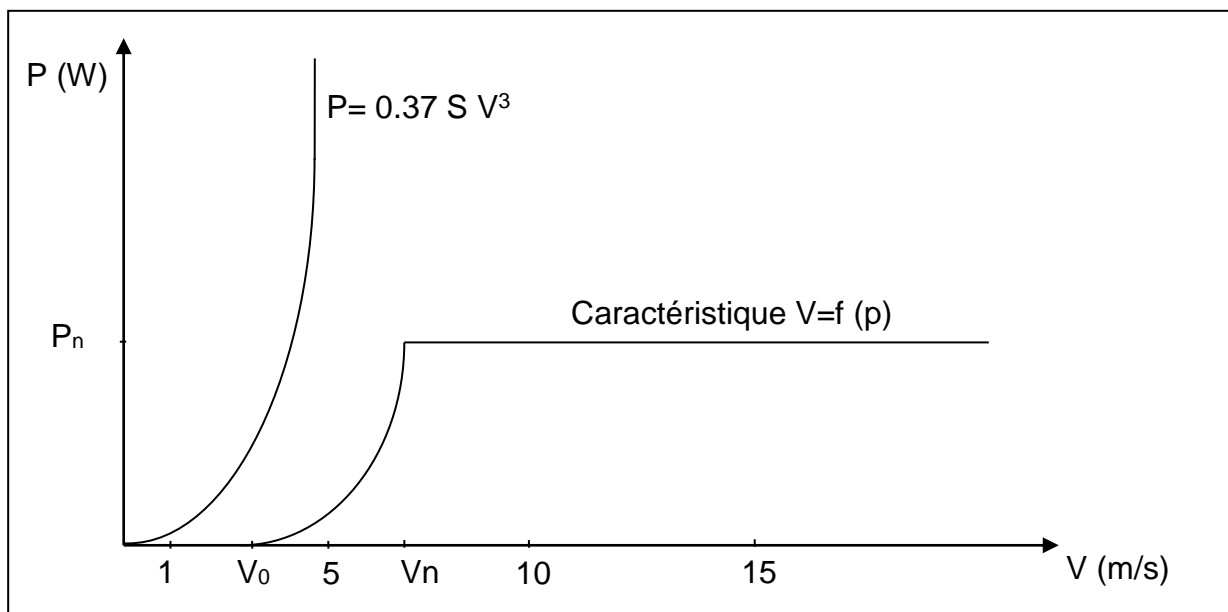


Figure 3.7 : Caractéristique $V = f(P)$ pour une éolienne de 2 m de diamètre

La figure 3.4, présente à titre d'exemple, la caractéristique d'un aérogénérateur de 2m de diamètre. La puissance maximale que peut absorber une éolienne est présentée par la courbe

$$P = 0.37\pi\left(\frac{D}{2}\right)^2 V^3 \quad (3.8)$$

On constate que l'aérogénérateur commence à développer une puissance à partir d'une vitesse V_0 , à la vitesse V_n , le dispositif de régulation commence à agir pour limiter la puissance absorbée par l'éolienne à une certaine valeur nominale P_n .

Cette puissance récupérable est celle que recueillerait une machine idéale.

Bien qu'établie pour une éolienne à axe horizontal, il est admis que cette valeur limite s'applique à la plupart des machines.

Le rendement maximal théorique d'une éolienne est de 59 %. Grâce à l'amélioration du profil et du revêtement des pales, les machines actuelles peuvent approcher les 50%. Mais l'utilisation de systèmes de carénage permet d'élargir la surface balayée et donc de dépasser les fameux 59%. Le diamètre des pales dépend de la hauteur du mat, il varie entre 0.75 et l'unité de cette dernière.

$$D = (0.75 \div 1)h \quad (3.9)$$

$$R = \frac{D}{2}$$

D : Diamètre des pales (m).

R : Rayon des pales (m).

On remarque que la puissance que délivre le rotor d'une éolienne dépend du diamètre de l'hélice, plus le diamètre de l'hélice est grand, plus l'éolienne délivre une puissance grande.

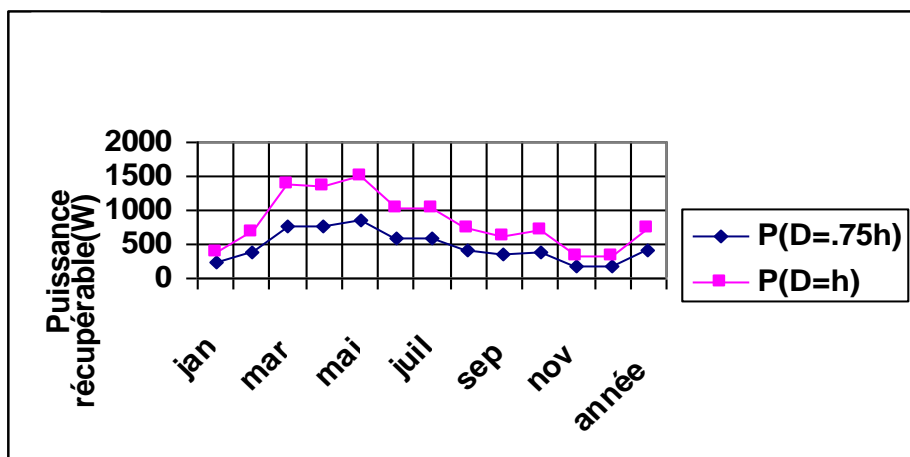


Figure 3.8 : Variation de la puissance récupérable au cours des mois et pendant l'année pour différents diamètres de l'hélice ($h=10m$).

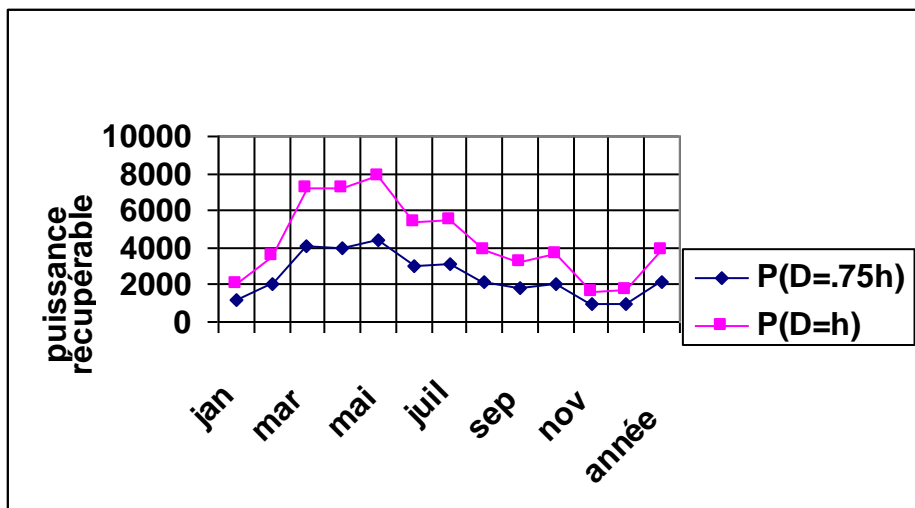


Figure 3.9 : Variation de la puissance récupérable au cours des mois et pendant l'année pour différents diamètres de l'hélice (h=20m).

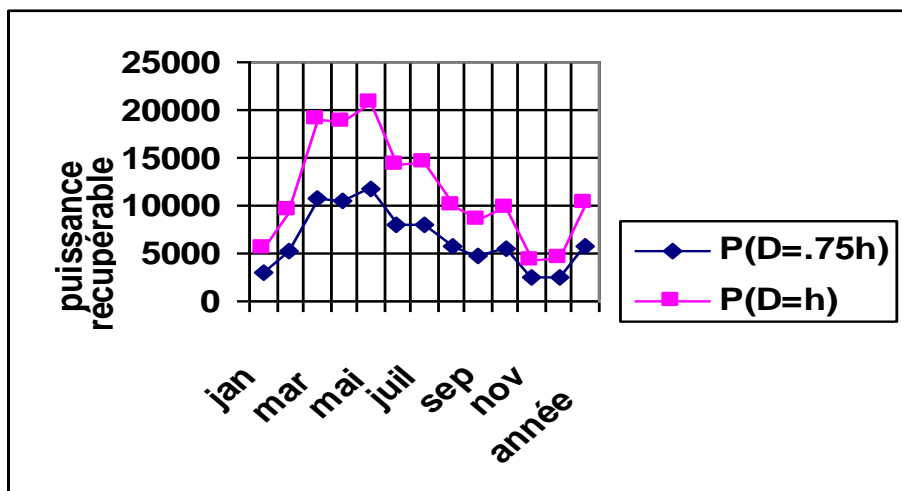


Figure : 3.10 Variation de la puissance récupérable au cours des mois et pendant l'année pour différents diamètres de l'hélice (h=30m).

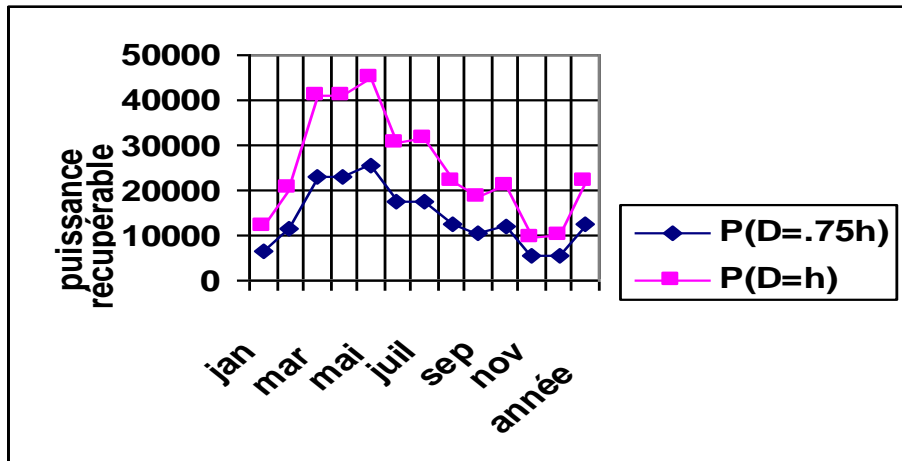


Figure3.11 : Variation de la puissance récupérable au cours des mois et pendant l'année pour différents diamètres de l'hélice (h=40m).

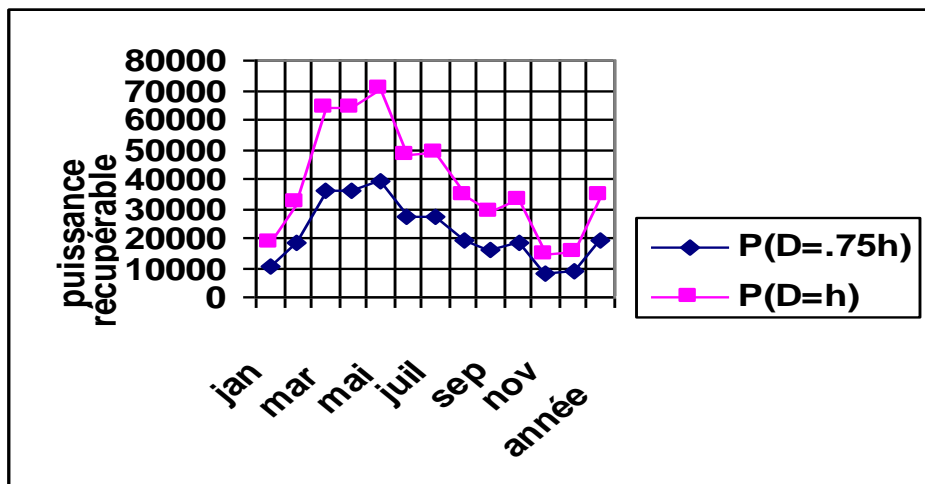


Figure3.12 : Variation de la puissance récupérable au cours des mois et pendant l'année pour différents diamètres de l'hélice (h=50m).

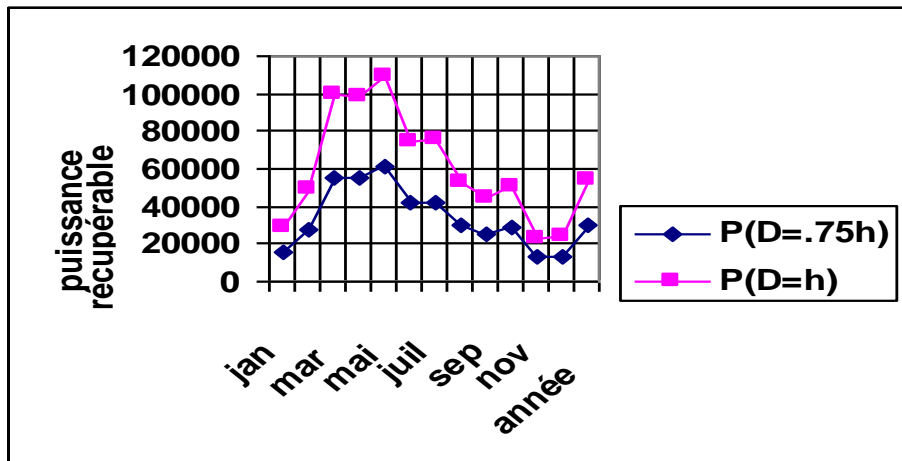


Figure 3.13 : Variation de la puissance récupérable au cours des mois et pendant l'année pour différents diamètres de l'hélice ($h=60m$).

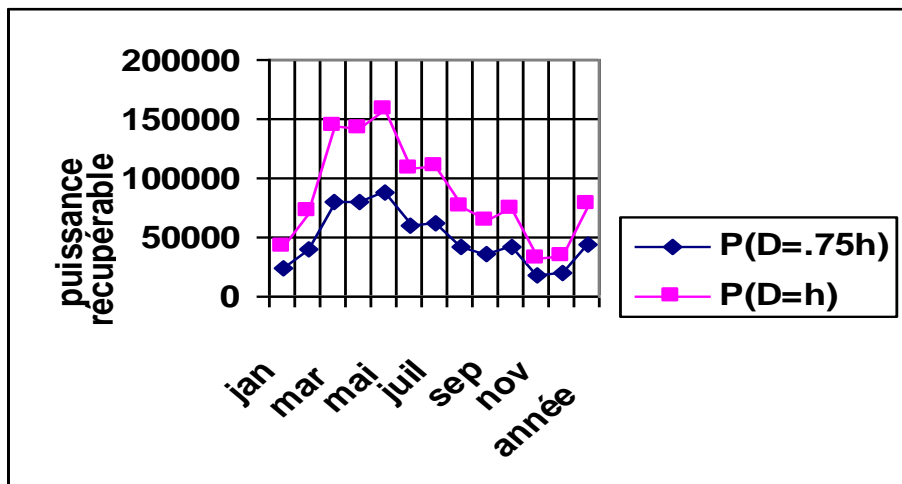


Figure : 3.14: Variation de la puissance récupérable au cours des mois et pendant l'année pour différents diamètres de l'hélice ($h=70m$).

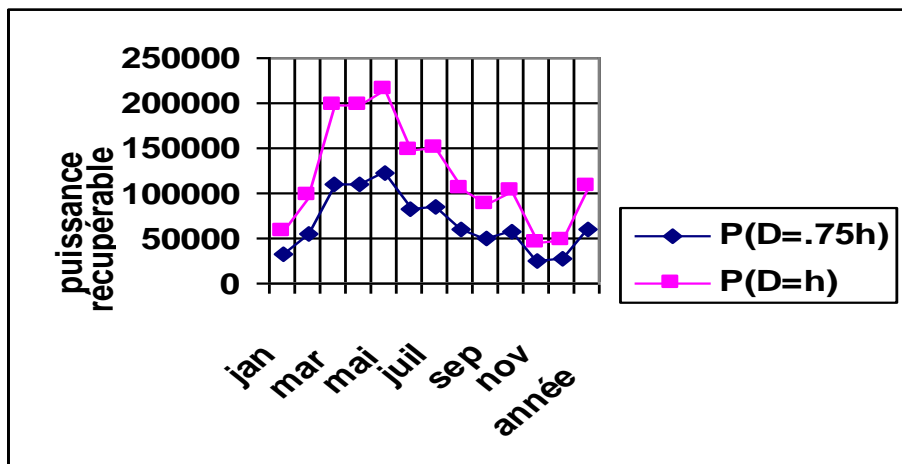


Figure3.15 : Variation de la puissance récupérable au cours des mois et pendant l'année pour différents diamètres de l'hélice (h=80m).

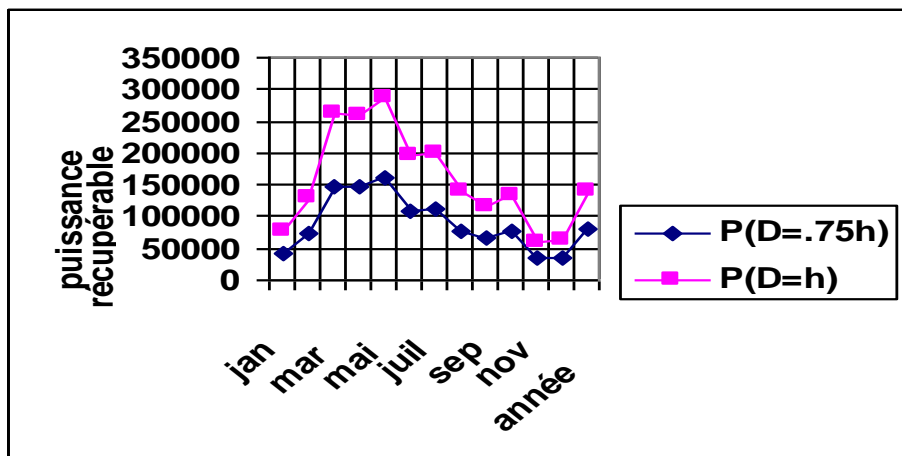


Figure3.16 : Variation de la puissance récupérable au cours des mois et pendant l'année pour différents diamètres de l'hélice (h=90m).

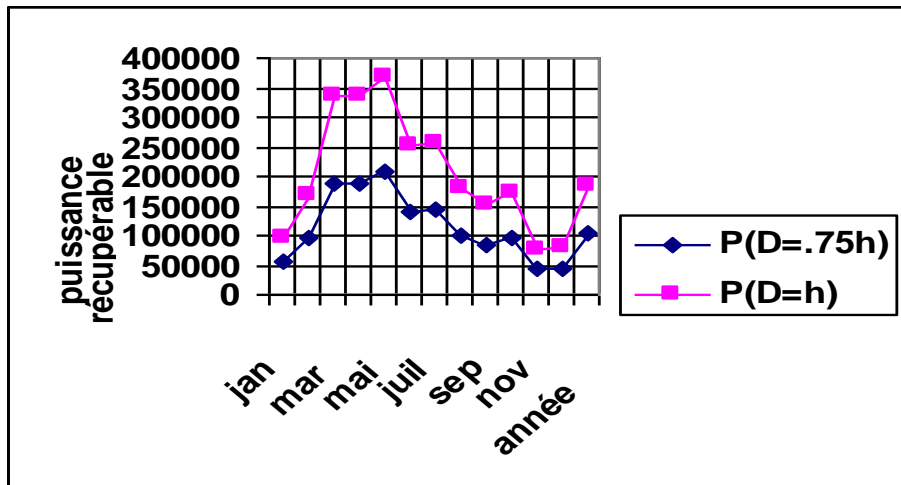


Figure 3.17 : Variation de la puissance récupérable au cours des mois et pendant l'année pour différents diamètres de l'hélice ($h=100m$).

3.8 Stratégies de commande de la turbine éolienne

3.8.1 Caractéristique puissance vitesse d'éoliennes de grande puissance

La caractéristique Puissance vitesse d'une éolienne peut se décomposer en quatre zones (figure 3.18).

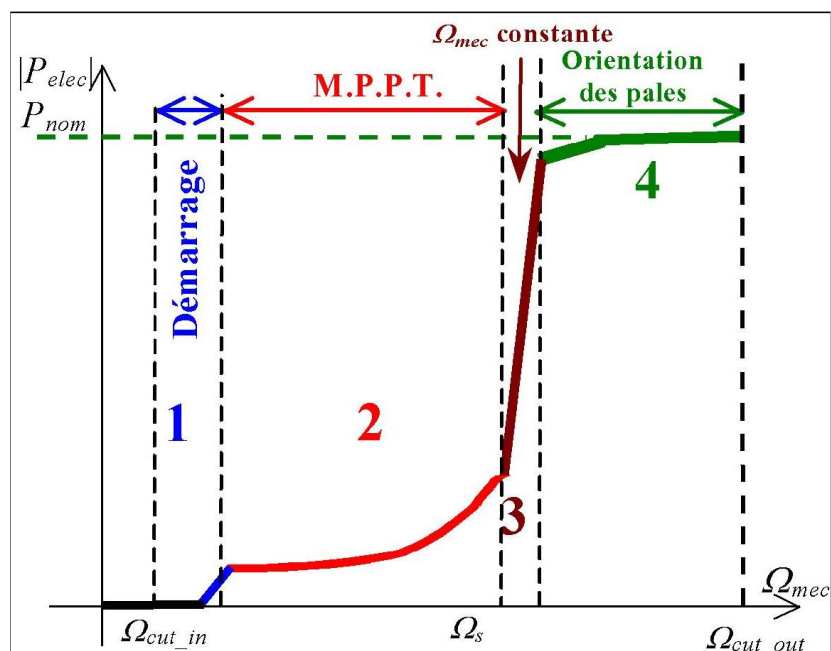


Figure 3.18 : Caractéristique puissance vitesse typique d'une éolienne de grande puissance.

La caractéristique équivalente mesurée sur l'éolienne de Schelle de 1.5MW est représentée sur la figure 3.19.

Quatre zones principales de fonctionnement peuvent être distinguées :

- Zone 1: C'est la zone de démarrage de la machine, elle commence lorsque la vitesse mécanique est supérieure à une certaine vitesse Ω_{cut-i} .
- Zone 2 : Lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale du vent est appliqué. Pour extraire le maximum de la puissance, l'angle de la pale est maintenu constant à sa valeur minimale, c'est-à-dire $\beta = 2^\circ$.

Ce processus continue jusqu' à atteindre une certaine valeur de la vitesse mécanique.

- Zone 3 : Au-delà, l'éolienne fonctionne à vitesse constante. Dans cette zone, la puissance de la génératrice atteint des valeur plus importantes, jusqu' à 90% de la puissance nominale P_{nom} .
- Zone 4 : Arrivée à la puissance nominale P_{nom} , une limitation de la puissance générée est effectuée à l'aide d'un système d'orientation des pales : pitch control.
- Au-delà de la vitesse $\Omega_{cut-out}$, un dispositif d'urgence est actionné de manière à éviter une rupture mécanique.

En pratique, le passage de la zone 2 à la zone 4 est un peu particulier. En effet, la vitesse de rotation est contrôlée par le couple électromagnétique C_{em} en zone 2 et en zone 4, c'est la puissance qui doit être contrôlée par le dispositif d'orientation des pales. Le système d'orientation des pales a une dynamique bien plus lente que la dynamique électrique de la machine. Ainsi, la lenteur de la régulation de l'angle de calage peut entraîner un dépassement de la vitesse de rotation limite lors d'une rafale se produisant pendant un fonctionnement entre les zones 2 et 4. Il est dans ce cas, intéressant de concevoir une procédure permettant d'anticiper l'action du dispositif d'orientation en régulant le couple électromagnétique de manière à contrôler la vitesse de rotation, dans cette zone 3 intermédiaire. La conception des dispositifs de commande pour chaque zone de fonctionnement est maintenant expliquée [28].

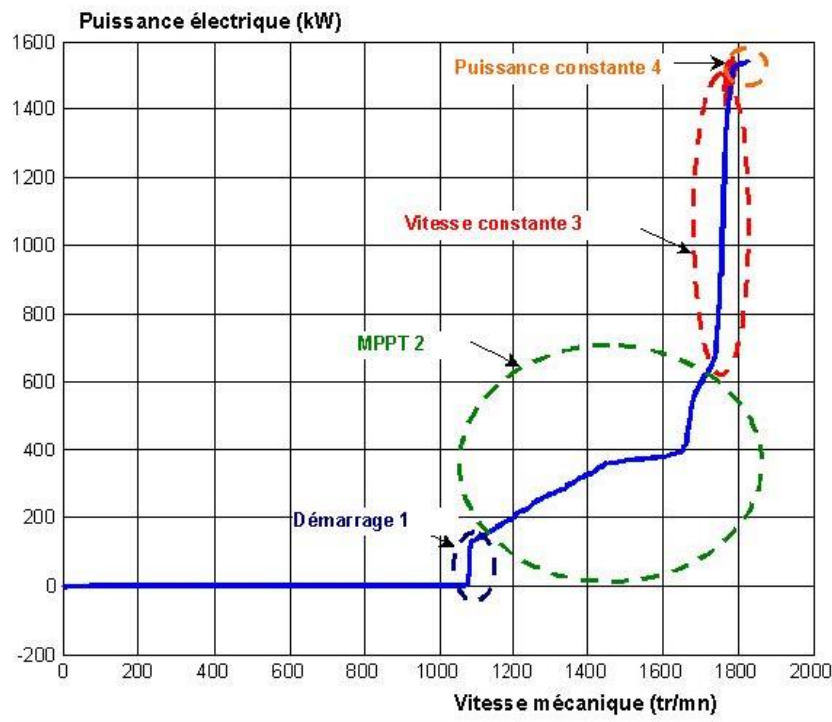


Figure 3.19 : Caractéristique puissance vitesse mesurée d'une éolienne de 1.5 MW.

3.9 vitesse de rotation de l'hélice

La vitesse de rotation de l'hélice est déterminée par le facteur du rendement r , qu'on prend égal à 8 et de la vitesse du vent.

$$VR = V.r.60/\pi.D \quad (3.10)$$

Avec VR :Vitesse de rotation de l'hélice (tour/min).

V :Vitesse du vent (m/s).

r :Facteur du rendement égal à 8.

D :Diamètre de l'hélice (m).

Pour différentes valeurs de V variant de la valeur minimale à la valeur maximale, et pour un diamètre égal à 60 m, on calculera les vitesses de rotation correspondantes. Les résultats sont groupés dans le tableau suivant :

Vitesse du vent (m/s)	3,5	4	4,5	5	5,5	6
Vitesse de rotation de l'hélice (tr/min)	8,914	10,188	11,46	12,737	14	15,28

3.10 Multiplicateur

Les multiplicateurs ont, en général, d'excellents rendements, on peut donc déduire les caractéristiques de puissance en sortie de l'arbre du multiplicateur, en multipliant la puissance obtenue sur l'arbre de l'aéromoteur par le rendement de ce multiplicateur.

Soit en déterminant la vitesse de rotation de l'hélice en tours par minute. Ensuite, on choisit un rapport de multiplication suivant le choix de la génératrice. On choisit alors un rapport de multiplication égal à 25.

3.11 La génératrice asynchrone (à cage d'écureuil)

La génératrice asynchrone transforme de l'énergie mécanique en énergie électrique. Pour réaliser cette transformation. Elle doit pour cela être entraînée au-delà de la vitesse de synchronisme (variable suivant la charge). Son rotor est à cage d'écureuil. La puissance nécessaire à sa magnétisation est fournie par le réseau lorsqu'elle est couplée en parallèle ou par une batterie de condensateurs dans le cas d'une utilisation isolée.

Pour déterminer la vitesse de la génératrice, on doit multiplier la vitesse de l'hélice par le rapport de multiplication m , calculé précédemment :

$$V_{\text{générateur}} = m \cdot V_{\text{hélice}}$$

Pour $m=25$, les valeurs de la vitesse de la génératrice sont données dans le tableau suivant :

Vitesse de l'hélice (tr/mn)	8,914	10,188	11,460	12,737	14,000	15,280
Vitesse de la génératrice (tr/mn)	222,8	254,7	286,5	318,4	350	382

La vitesse de la génératrice est :

$$N = f/p \cdot 60 \quad (3.11)$$

Avec

f : Fréquence égale à 50 Hz.

P : Nombre de paires de pôles.

3.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous a permis de dresser un panel des solutions électrotechniques possibles pour la production d'énergie électrique grâce à des turbines éoliennes. Après un rappel, après avoir présenté les stratégies de fonctionnement d'une éolienne, ensuite nous avons montré la variation de la vitesse du vent en fonction de la hauteur du mat et la variation de la puissance récupérable au cours des mois et pendant l'année pour différents diamètres de l'hélice et pour chaque hauteur.

La dernière partie de ce chapitre a décrit la très proche similitude obtenue entre la caractéristique statique de la puissance en fonction de la vitesse mécanique simulée et celle obtenue expérimentalement, et ce dans les 4 zones de fonctionnement et la vitesse de rotation de l'hélice en fonction de la vitesse du vent .

Chapitre quatre

Modélisation et simulation d'un système éolien

4.1 Introduction

Lorsque le système existe est également dans l'objectif d'optimiser leur conception, les problèmes de modélisation et de commande sont extrêmement nombreux. La complexité de ces systèmes nécessite de recourir à des méthodes efficaces, [29]. La conception, la commande et la régulation sont l'objectif de plusieurs recherches. Une éolienne est dimensionnée pour développer sur son arbre une puissance nominale P_n . Lorsque la vitesse du vent est supérieure à une vitesse nominale V_n , la turbine éolienne doit modifier ses paramètres afin d'éviter la destruction mécanique, de sorte que la vitesse de rotation reste constante, donc elle nécessite un système de régulation permettant d'éviter ce problème.

L'objectif de ce chapitre est la modélisation d'un système éolien, sa simulation sous Matlab, ainsi que la conception d'un système de régulation pour maintenir la tension de sortie constante. L'éolienne est conçue pour alimenter un site isolé.

Dans ce chapitre, on commencera par donner le modèle d'un système éolien et la description du processus. Ensuite, on présentera la modélisation et la simulation de l'éolienne conçue. En dernier lieu on effectuera une analyse des résultats.

4.2 Description d'une éolienne

Les installations utilisant l'énergie éolienne comportent classiquement cinq parties :

- Une turbine éolienne.
- Une génératrice électrique.
- Une charge, ou utilisation (chauffage électrique).
- Un convertisseur.
- Un système de commande et de régulation.

Toutes les stations destinées à la production d'électricité ont une configuration qui correspond à l'organigramme de la figure 4.1, [18].

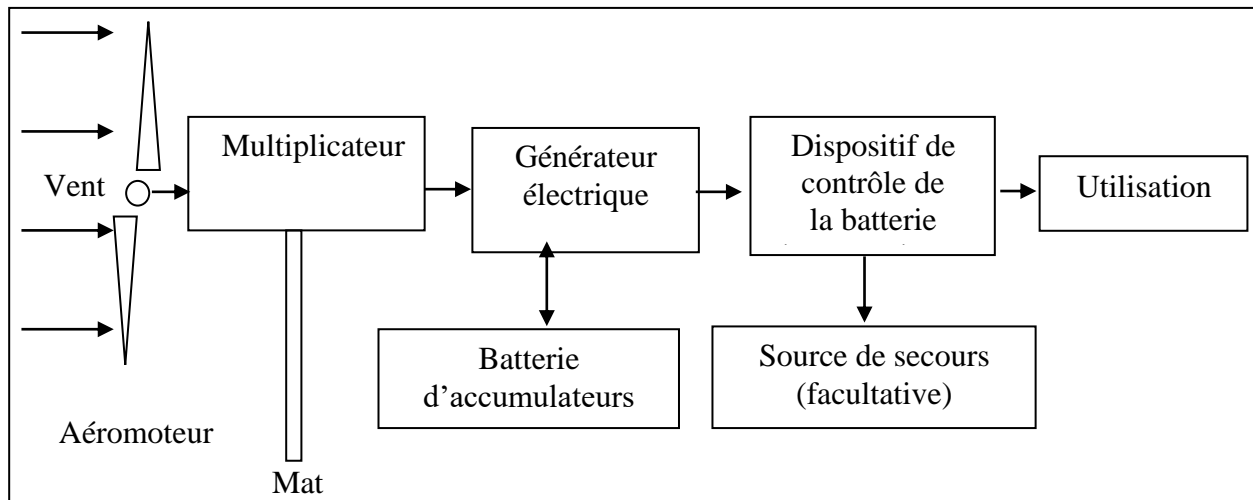


Figure 4.1 : Organigramme d'une station de génération d'énergie électrique par aérogénérateur.

4.3 Constitution et fonctionnement d'une génératrice asynchrone

4.3.1 Présentation

La machine se compose de deux pièces principales :

- Le stator est relié au réseau ou un variateur de vitesse
- Le rotor est constitué de conducteurs en court circuit qui sont parcourus par des courants induits par le champ magnétique créé par les courants statoriques. C'est la principale différence avec une machine synchrone, laquelle a un rotor avec un champ magnétique provenant d'aimants permanents ou de bobines alimentées en courant continu.

Cette machine peut, selon sa construction, être reliée à un réseau monophasé ou polyphasé (généralement triphasé car c'est celui de la distribution).

La machine asynchrone est la machine électrique la plus utilisée dans le domaine des puissances supérieures à quelques kilowatts car elle offre alors le meilleur rapport qualité prix. Surtout depuis l'apparition dans les années 1970 de variateurs permettant de faire varier la fréquence de rotation du moteur dans une large gamme.

Bien que réversible, la machine asynchrone est principalement (mais pas exclusivement) utilisée en moteur.

4.3.2 Principes généraux

Les courants statoriques créent un champ magnétique tournant dans le stator. La fréquence de rotation de ce champ est imposée par la fréquence des courants statoriques, c'est-à-dire que sa vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence de l'alimentation électrique. La vitesse de ce champ tournant est appelée vitesse de synchronisme.

L'enroulement au rotor est donc soumis à des variations de flux (du champ magnétique). Une force électromotrice induite apparaît qui crée des courants rotoriques. Ces courants sont responsables de l'apparition d'un couple qui tend à mettre le rotor en mouvement afin de s'opposer à la variation de flux : loi de Lenz. Le rotor se met donc à tourner pour tenter de suivre le champ statorique.

La machine est dite asynchrone car elle est dans l'impossibilité, sans la présence d'un entraînement extérieur, d'atteindre la même vitesse que le champ statorique. En effet, dans ce cas, vu dans le référentiel du rotor, il n'y aurait pas de variation de champ magnétique ; les courants s'annuleraient, de même que le couple qu'ils produisent, et la machine ne serait plus entraînée. La différence de vitesse entre le rotor et le champ statorique est appelée vitesse de glissement.

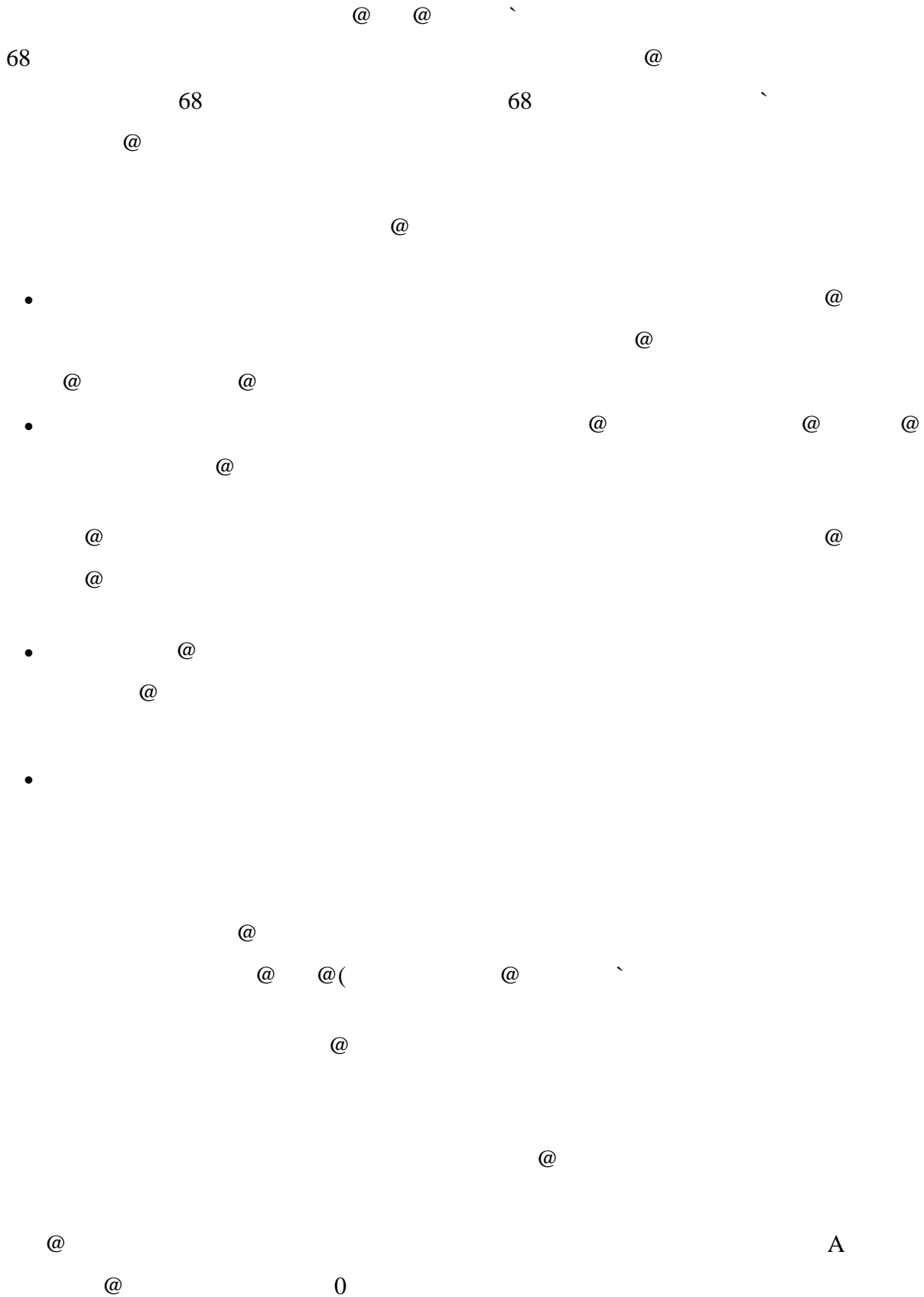
Lorsqu'il est entraîné au-delà de la vitesse de synchronisme [fonctionnement hyper synchrone] la machine fonctionne en générateur alternatif. Mais son stator doit être forcément relié au réseau car lui seul peut créer le champ magnétique nécessaire pour faire apparaître les courants rotoriques.

Un fonctionnement en générateur alternatif autonome est toutefois possible à l'aide de condensateurs connectés sur le stator, à condition qu'il existe un champ magnétique rémanent. On retrouve cette même problématique lorsqu'on cherche à faire fonctionner des machines à courant continu à excitation série en génératrice. À défaut, des dispositifs d'électronique de puissance et une batterie permettent d'amorcer le fonctionnement en génératrice autonome. Cette solution est mise en œuvre pour produire de l'électricité à l'aide d'éoliennes dans des sites isolés.

4.3.3 Glissement d'une machine asynchrone

Le glissement est une grandeur qui rend compte de l'écart de vitesse de rotation d'une machine asynchrone par rapport à une machine synchrone hypothétique construite avec le même stator.

Le glissement est toujours faible, de l'ordre de quelques pour-cent : de 2 % pour les machines les plus grosses à 6 ou 7 % pour les petites machines triphasées, il peut at



69

@

@

@

@ !

6969

A

•

@

•

D

@

@

@

@

@

@

@

69

@

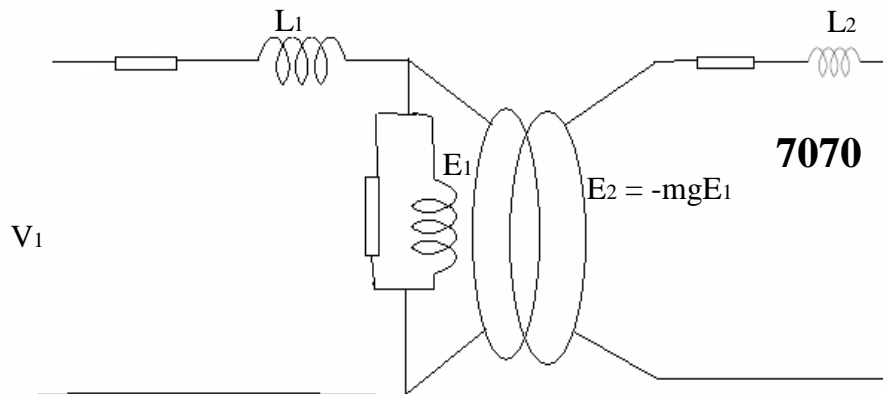
69

@

@

7070

70707070



70

Figure 4.2 : schéma équivalent de la machine asynchrone.

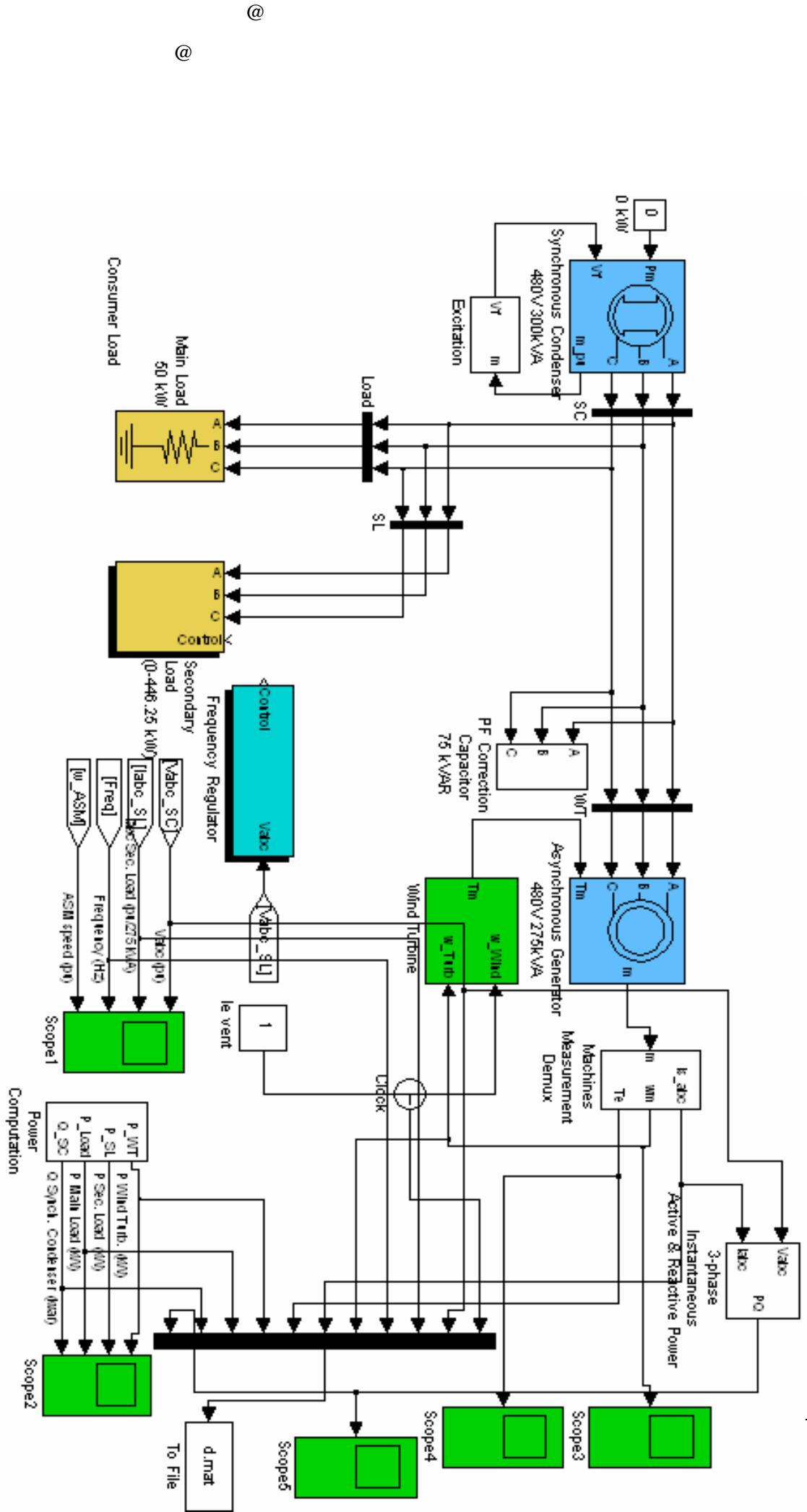
$$r_1 \quad @ \quad @ \quad l_2 = -1/m(I_1 - I_{10}) \quad r_2 \quad @ \quad @$$

A @

$$@ \quad ! \quad @ \quad @$$

$$@ \quad @ \quad @$$

$$@ \quad @$$



! @		
@ @ @		
\$ @		
@ \ @ J		2 (kg.m ²)
Facteur de friction et frottement visqueux	F	0 (pu)
Nombre de paires des pôles	P	2

Tableau 4.1: les paramètres de la génératrice asynchrone.

Nous allons supposer l'éolienne ainsi conçue alimente une charge située dans un site isolé, dans un premier temps la charge est constante, et nous allons supposer que la vitesse du vent est soit :

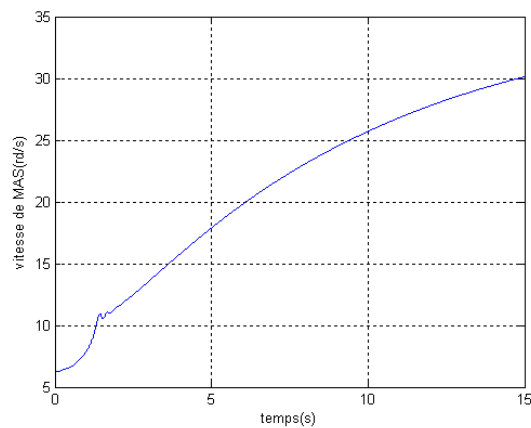
- Constante.
- Variable brusquement suivant un échelon.
- Variable suivant une sinusoïde.

Ensuite nous allons voir l'effet de ces variations de la vitesse du vent sur les paramètres suivants:

- Vitesse de rotation de la génératrice asynchrone $W_m(\text{rd/s})$;
- Puissance active qui la délivre la génératrice $P(\text{KW})$;
- Puissance réactive absorbée par la génératrice $Q(\text{KVAR})$;
- Tensions et courant dans la charge $V_{abc}(\text{V})$ et $I_{abc}(\text{A})$;
- Fréquence du système $\text{Freq}(\text{Hz})$.

4.5.1 Vitesse du vent constante

Supposons que le vent est pratiquement constant avec une valeur de 10 m/s. Après simulation, on obtient les résultats suivants. Les figures suivantes représentent les variations de $W_m, P, Q, V_{abc}, I_{abc}$ et Freq pour une vitesse de vent constante.



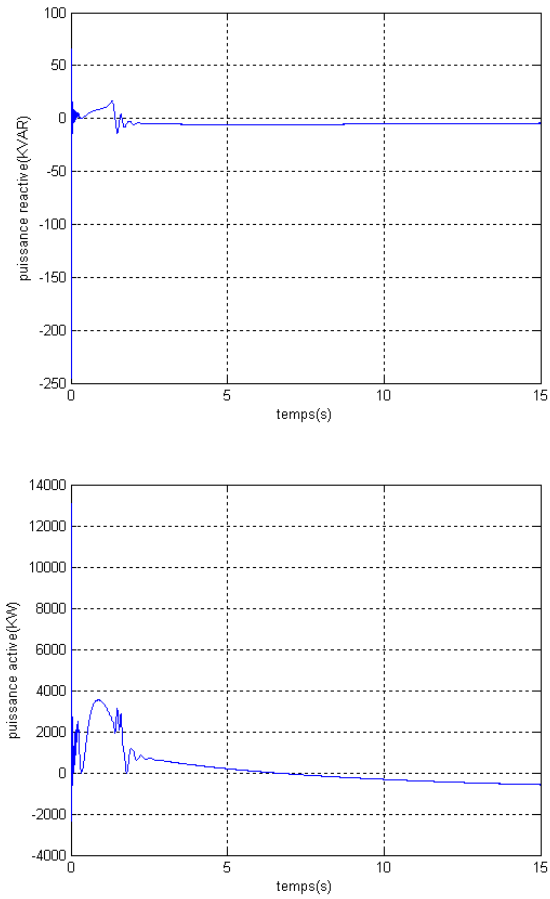
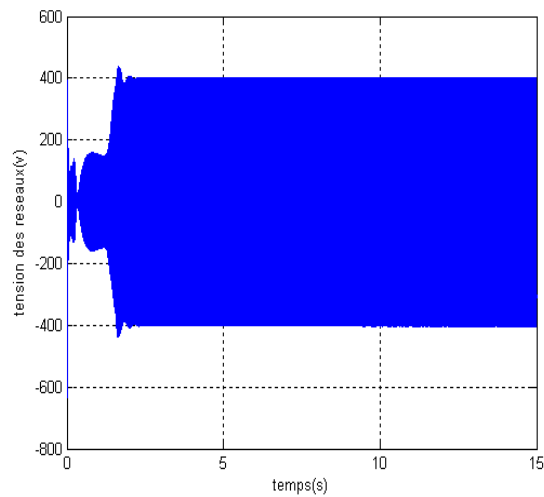


Figure 4.4: Variation de la vitesse de la MAS, de la puissance réactive et de la puissance active dans le cas où la vitesse du vent est constante sans régulation.



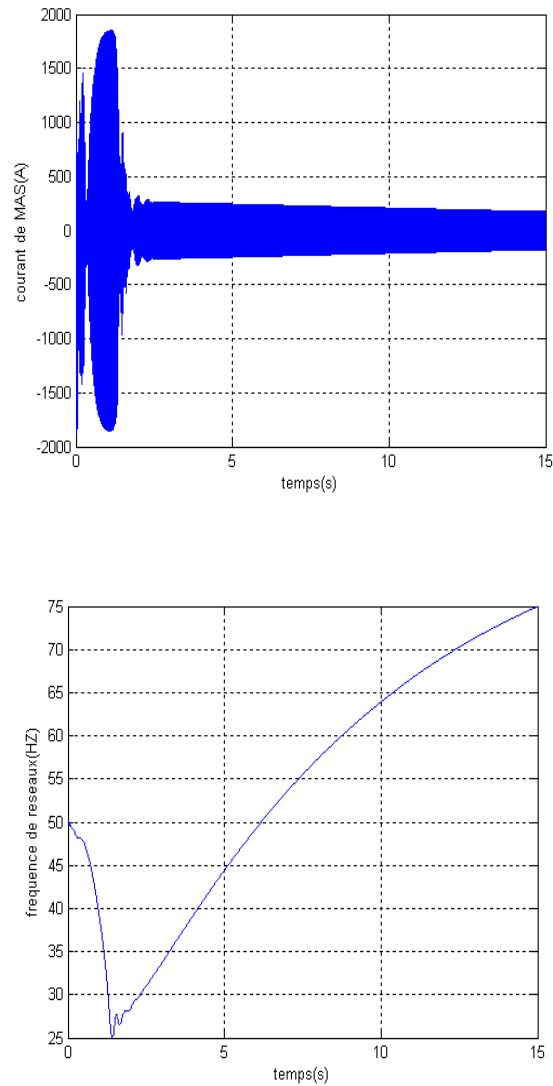


Figure 4.5: Variation de la tension, du courant et de la fréquence dans le cas où la vitesse du vent est constante sans régulation.

4.5.2 Vitesse du vent variable suivant une sinusoïde

La simulation d'un vent oscillatoire, donne les figures suivantes qui représentent les variations de $W_m, P, Q, V_{abc}, I_{abc}$ et F_{req} pour une vitesse de vent variable suivant une sinusoïde

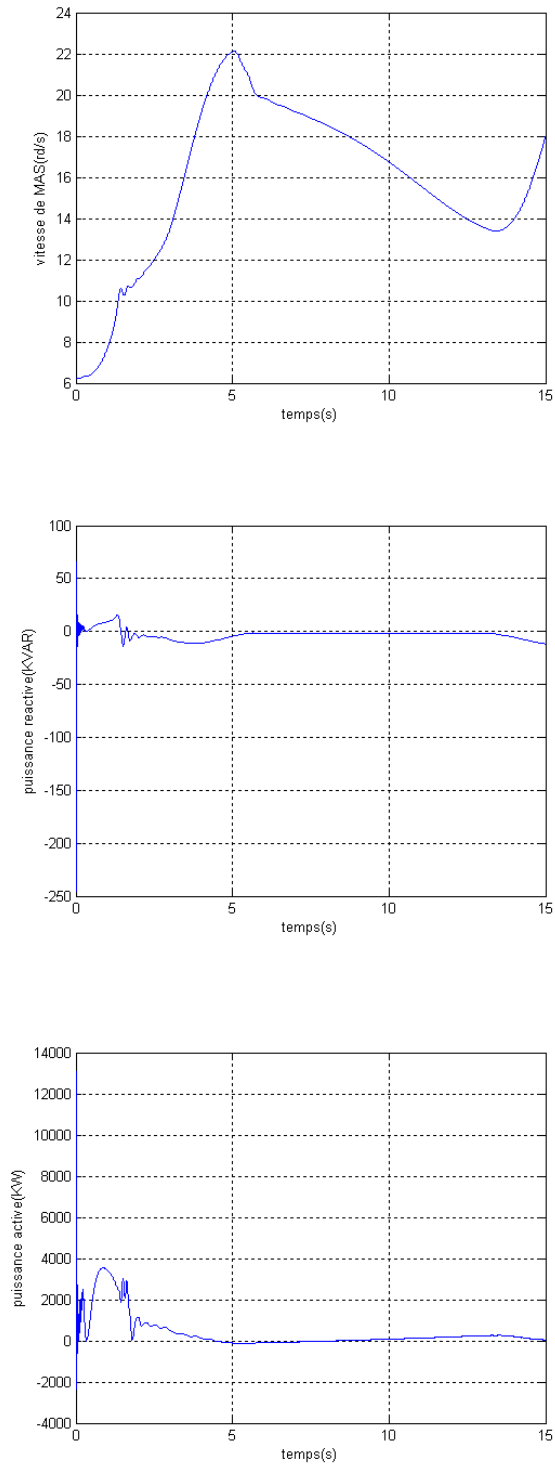


Figure 4.6: Variation de la vitesse de la MAS, de la puissance réactive et de la puissance active dans le cas où la vitesse de vent est variable (sinusoïde).

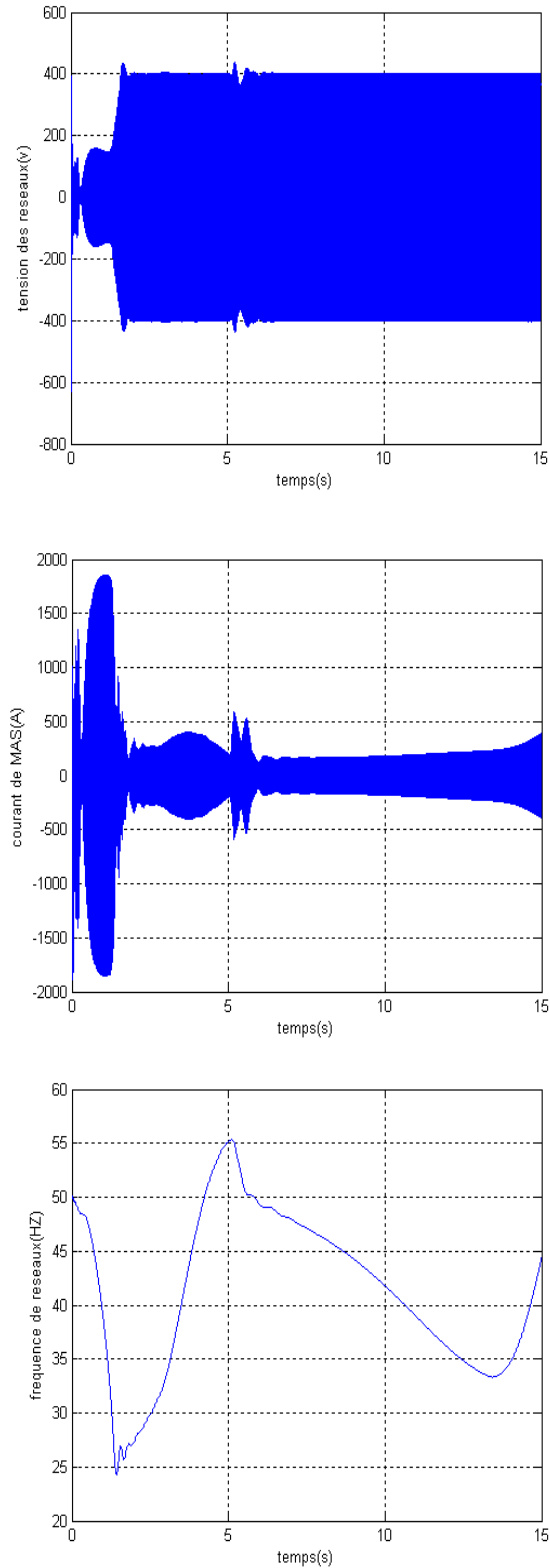


Figure 4.7: Variation de la tension, du courant et de la fréquence dans le cas où la vitesse du vent est variable (sinusoïde).

4.5.3 Vitesse du vent variable brusquement suivant un échelon

Dans ce cas, nous allons supposer que la vitesse du vent varie brusquement selon un échelon d'une valeur minimale de 6 m/s à une valeur maximale de 9m/s .Les figures suivantes représentent les variations de $W_m, P, Q, V_{abc}, I_{abc}$ et Freq pour une vitesse de vent variable brusquement.

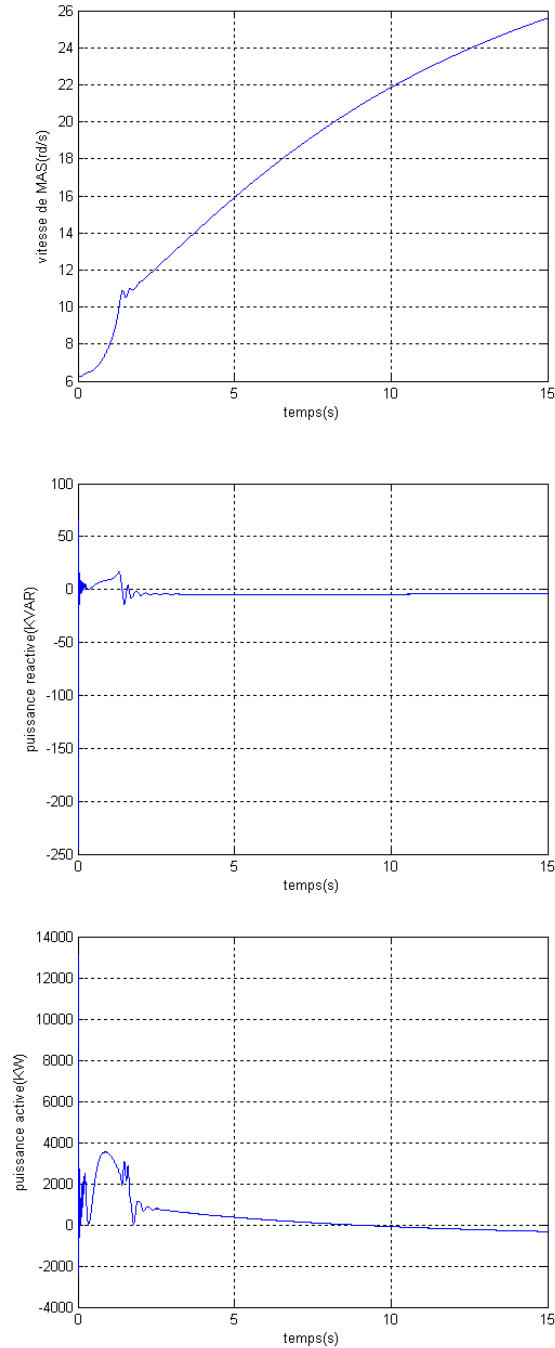


Figure 4.8: Variation de la vitesse de la MAS, de la puissance réactive et de la puissance active dans le cas où la vitesse de vent est variable (échelon).

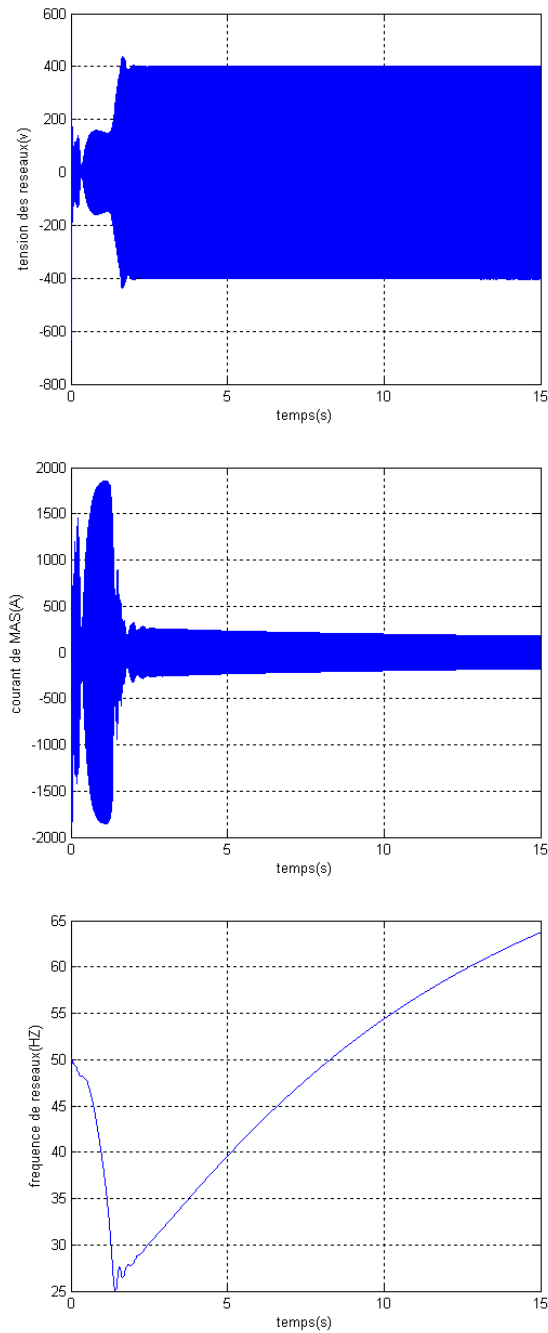


Figure 4.9: Variation de la tension, du courant et de la fréquence dans le cas où la vitesse du vent est variable (échelon).

4.6 Simulation du système avec régulation

Dans le cas d'une vitesse du vent pratiquement constante sur une valeur de 10 m/s, nous utilisons un système avec régulation, pour avoir la vitesse synchronisme constante, c'est à dire pour avoir la stabilité du système.

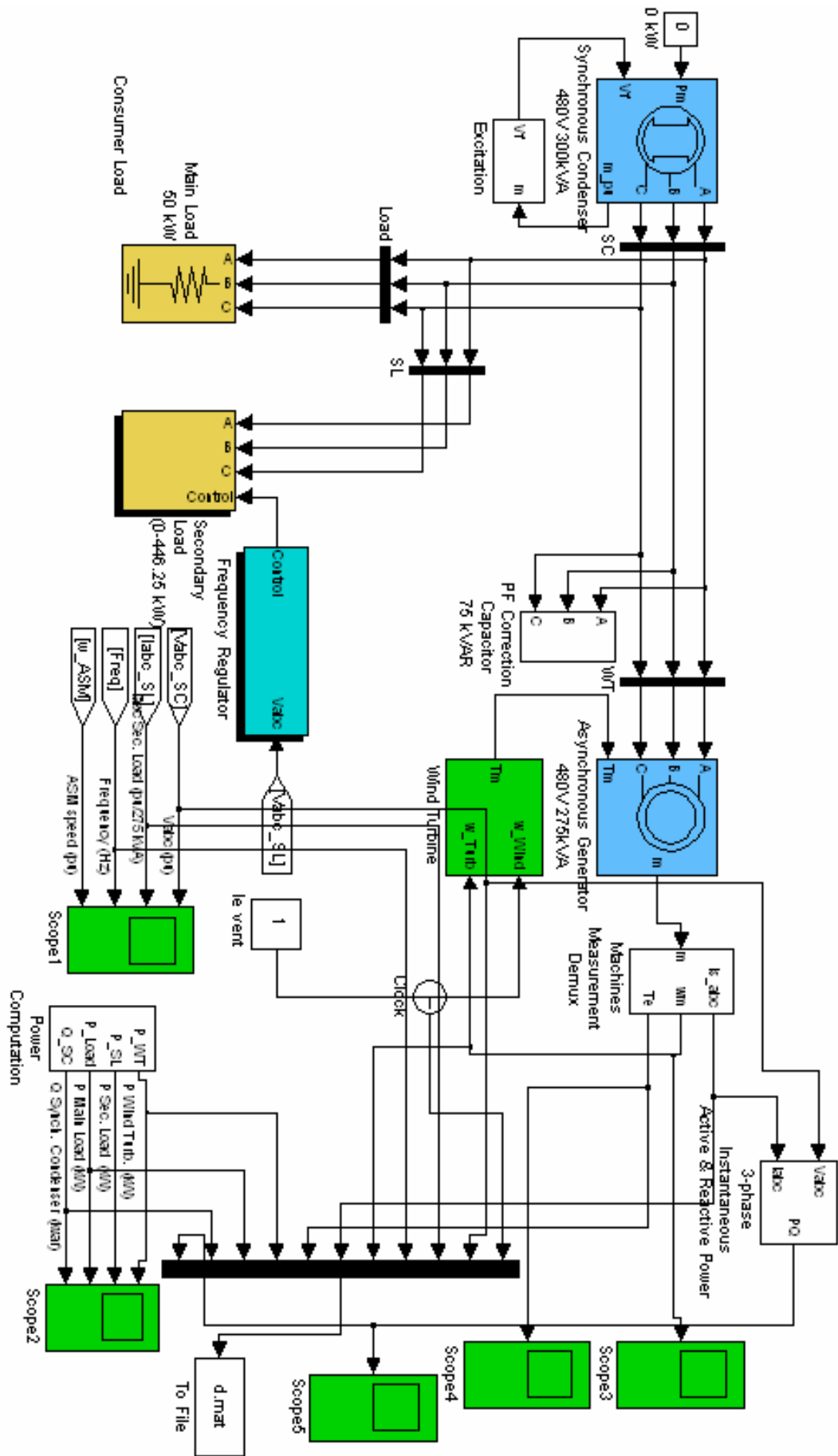


Figure 4.10 : représentation du système en bloc sous Matlab (boucle fermé)

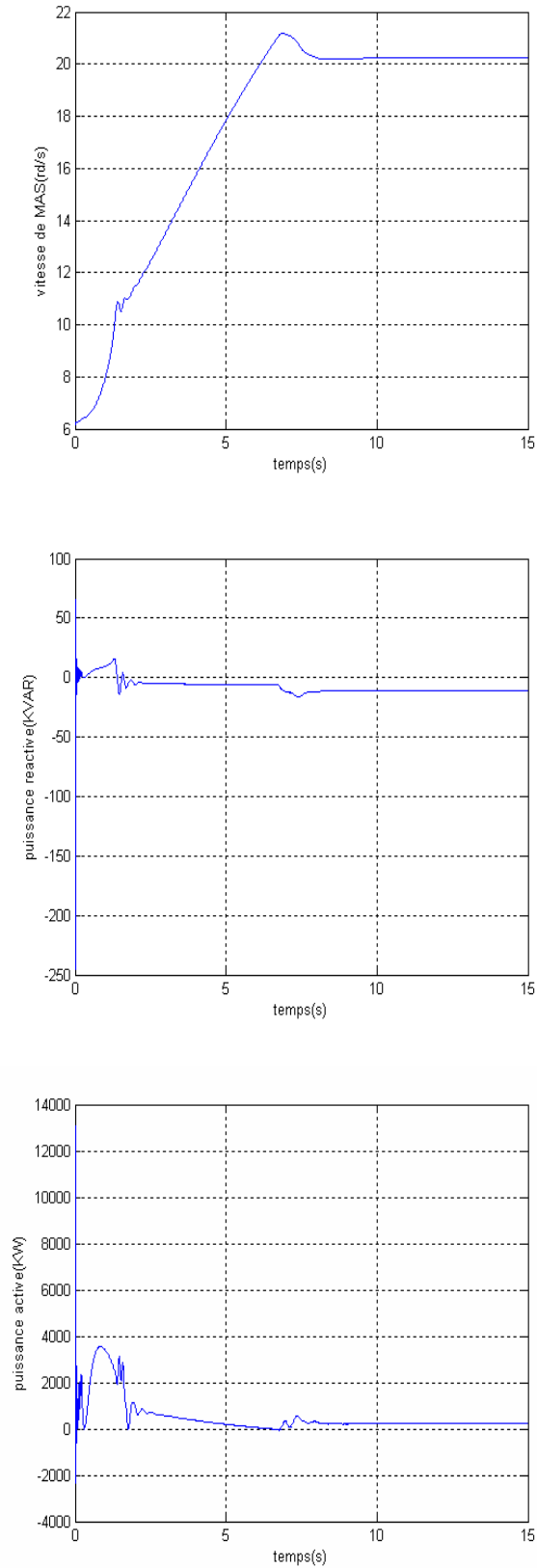


Figure 4.11. Variation de la vitesse de la MAS, de la puissance réactive et de la puissance active dans le cas où la vitesse de vent est constante avec régulation.

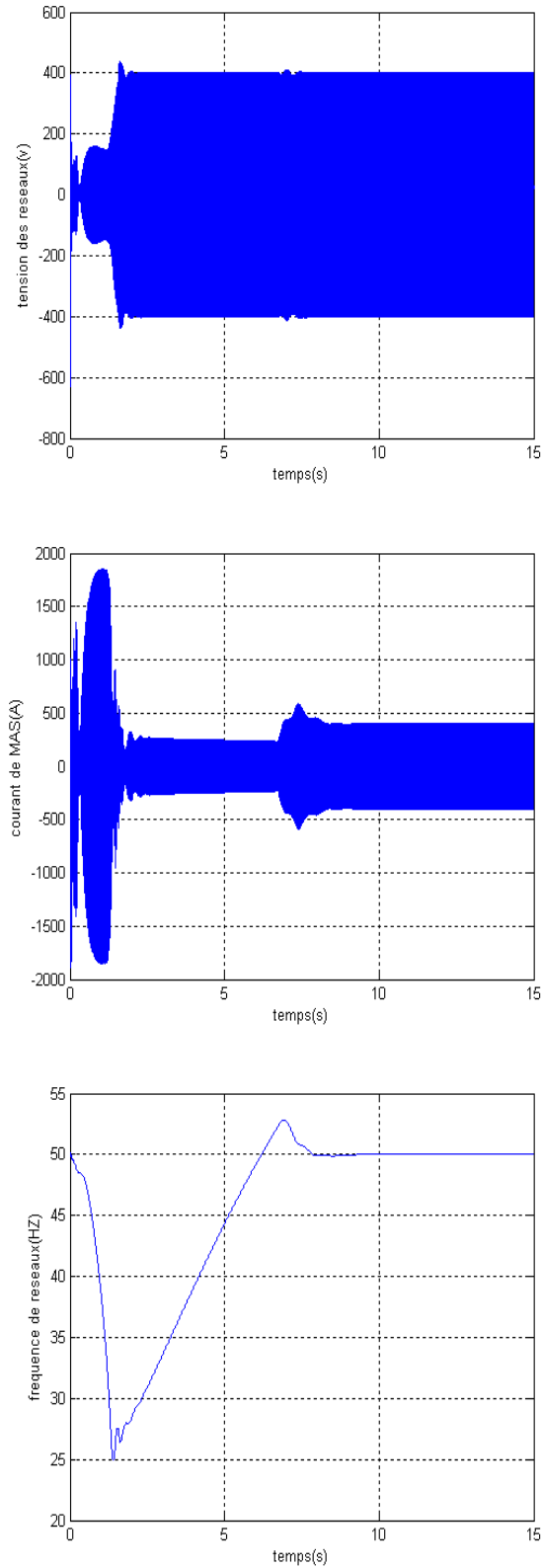


Figure 4.12 Variation de la tension, du courant et de la fréquence dans le cas où la vitesse du vent est constante avec régulation.

Interprétation des résultats obtenus

Dans les figures 4.4, 4.6 et 4.8, la vitesse s'accroît avec le temps à partir des valeurs non nulles, sous aucune convergence.

Ce comportement de la vitesse dû à la non régulation de la MAS.

En revanche, dans la figure 4.11 la vitesse s'accroît avec le temps à partir d'une valeur non nulle, avec une convergence remarquable (ce qu'on appelle le régime permanent) vers une valeur constante (≈ 20 rd/s). Cette convergence c'est un résultat direct de la régulation de la MAS.

Dans les figures 4.5, 4.7 et 4.9, la fréquence du réseau commence de $f=50$ HZ, (pour $t=0$ s), qui est la fréquence du synchronisme de la MAS, puis elle diverge carrément de cette valeur.

L'instabilité de la fréquence sur la valeur $f=50$ HZ et due à la non régulation de la MAS.

Par contre, dans la figure 4.12 où la MAS fonctionne avec régulation, la fréquence du réseau se converge vers sa valeur initial $f=50$ HZ.

Les figures 4.4, 4.6 et 4.8 non permettent de conclure que la puissance active générée par la MAS, varie d'une façon irrégulière car le système fonctionne sans régulation (la MAS tantôt fonctionne comme moteur, $P<0$, et tantôt elle fonctionne comme génératrice $P>0$).

En revanche, la figure 4.11 nous permet de dire que la MAS avec régulation a un régime permanent constant et positive où le centrale fonctionne d'une façon normale.

Dans les figures 4.4, 4.6, 4.8 et 4.11 la puissance réactive est toujours absorbée par la MAS (on par le toujours du régime permanent), soit dans le cas sans régulation ou dans le cas avec régulation, sauf que dans le deuxième cas (fig 4.11) la puissance en question est absorbée avec une quantité constante (c'est la valeur de saturation de la MAS).

Dans les figures 4.5, 4.7, 4.9, 4.12 , la tension du réseau dans son régime permanent prend une amplitude constante, qui représente la tension souhaitée, soit sous ou avec régulation.

Dans les figures 4.5, 4.7 et 4.9 (MAS sans régulation), le courant dans son régime permanent prend des amplitudes variables, selon les cas, par contre dans la figure 4.12 (MAS avec régulation), le courant dans son régime permanent, prend une amplitude constante, (c'est le rôle de la régulation).

4.7 Conclusion

L'éolienne conçue est une éolienne comportant tous les éléments de la chaîne de transformation énergétique, le modèle proposé est simple, il nous a permis de voir :

- + L'effet de la variation du vent sur la production d'énergie.
- + Nécessité d'une batterie de condensateur pour la magnétisation de la génératrice asynchrone.
- + Nécessité d'un système de régulation, qui permet de maintenir la vitesse de la génératrice asynchrone constante ce qui conduit au maintien de la fréquence quelque soit les variations de la vitesse du vent.

Conclusion

Générale

De nos jours maîtriser l'énergie est devenu un challenge politique et économique tout à la fois qui suscite des conflits, mais y a-t-il un moyen afin de maîtriser cette demande énergétique diminuer nos consommations d'énergie primaire (gaz, pétrole, charbon) . En ayant recours aux énergies renouvelables plus abondantes et moins chers pendant leur transformation ou leur conversion, est déjà une solution .parmi ces énergies, l'énergie éolienne étant donné qu'elle joue un rôle primordial dans la production d'énergie renouvelable, sans rejet toxique ni émission du gaz CO₂, et dont le vent représente un terrain de recherche important. À présent, on se satisfait de courbes de distribution basées sur le prototype Wei Bull lorsqu'il s'agit de produire l'électricité par l'entremise du vent, cette distribution est utilisée davantage pour ajuster les données expérimentales du vent avec exactitude .

Travail accompli

Dans ce projet, nous avons eu l'occasion de connaître les différentes sortes d'énergies qui se trouvent à travers le monde, grâce à la recherche bibliographique sur ce domaine en question, et en particulier l'énergie éolienne dont elle a fait l'objet de ce modeste travail.

Une étude théorique des systèmes éoliens de production d'électricité e été réalisé, en faisant une synthèse sur les méthodes actuelles de conception avec un approfondissement sur les phénomènes physiques mis en jeu dans les aérogénérateur, en outre les composants constituant ces systèmes sont passés en revue pour pouvoir réaliser dans le futur proche des modèles d'éoliens sans interruption connecté soit au réseau national, soit pour des sites isolés.

Les différents composants d'une éolienne sont étudiés. Ensuite le potentiel éolien est évalué à partir des données météorologiques.

Observations Générales

1. Evaluation du potentiel éolien

L'évaluation du potentiel éolien est d'une importance capitale pour la conception d'un système éolien, elle est basée sur des propriétés statistiques de la vitesse et de la direction du vent. Le modèle basé sur la distribution de Weibull nous permet d'identifier la région la plus ventée. Cette étude montre l'importance des variations du vent à la fois dans le temps et dans l'espace. En raison de ces variations, l'utilisation des données du vent pour l'application à l'énergie éolienne doit être faite avec prudence, l'examen de la qualité des données est indispensable avant toute exploitation statistique.

2. Dimensionnement

L'énergie éolienne récupérable dépend à la fois des caractéristiques de la machine et de la distribution statistique. Le paramètre qu'on peut faire varier et qui influe sur la vitesse du vent c'est la hauteur du mat, qui dépendra à son tour essentiellement des obstacles environnants. Plus on monte en hauteur, plus on récolte du vent. C'est pourquoi la taille de l'éolienne sera choisie à partir de la puissance récupérable, qui est déterminée selon que cette éolienne sera conçue pour être connectée au réseau ou bien conçue pour alimenter un site isolé.

Modélisation et simulation

Une machine asynchrone avec un couple électromagnétique négatif fonction en génératrice, c'est ainsi qu'elle a été représentée dans le modèle, c'est pourquoi le système est représenté à l'envers pour pouvoir le simuler.

La simulation nous a permis de voir les variations de la vitesse de la génératrice en fonction de la vitesse du vent, les puissances actives produites et les puissances réactives absorbées.

L'introduction d'une batterie de condensateur de puissance réactives aux bornes de la génératrice est indispensable dans le cas d'une utilisation isolée, pour compensation de la puissance réactive.

Perspectives et suggestions

Pour les constructeurs d'éoliennes, l'objectif principal des activités de recherches et développement est de continuer d'améliorer le coût et la performance des éoliennes.

Le projet n'est qu'un début pour d'autres sujets de recherches comme :

- *Le développement de logiciel pour le dimensionnement des installations éoliennes.*
- *Le développement et réalisation des systèmes de régulation et de contrôle.*
- *La maîtrise des phénomènes de stockage de l'énergie éolienne.*
- *La réalisation d'un banc d'essai expérimental.*

C'est un domaine de recherche très vaste et c'est une technologie nouvelle dans notre pays, malgré sa croissance dans le monde. Nous souhaitons que ce projet se réalisera un jour en Algérie, surtout que les énergies renouvelables sont devenues une réalité nationale quotidienne au service d'un développement socio-économique durable en vue de la préservation de notre environnement.

Références Bibliographiques

- [1] www.doc.ac.uk/claric/eae/frenchisustainability/olderIRnewable_energie.htm.
 - [2] www.perso.wanadoo.fr/ageden/energies_renouvelables/enr1.htm.
 - [3] Djabali Naïma, «Energies renouvelables qualité de l'énergie électrique» mémoire de fin d'études, Université de Batna, 2004.
 - [4] Jean Hladik, "Energétique éolienne", Chauffage éolien. Production d'électricité. Pompage. 1984.
 - [5] www.perso.wanadoo.fr/ageden/energies_renouvelables/inr1.htm.
 - [6] Slimane Wissem « Energie éolienne » mémoire de fin d'études, Université de Batna, 2004.
 - [7] Encyclopédie Multimédia, Atlas et organise notes, Microsoft encarta collection 2005.
 - [8] C. Khelil, Ministre de l'énergie et des mines, « Guide des énergies Renouvelables en Algérie ».
 - [9] www.ca-cretiel.fr/physique/DocGRISP/energie/Energie.htm.
 - [10] www.Cancern.gc.ca/earth/index_f.asp.
 - [11] M.Houadfi, "Régénération de l'énergie électrique dans les systèmes autonomes à l'aide d'un moteur asynchrone à cage".Mémoire de fin d'étude, DEUA, Université de Batna, 1993.
 - [12] Encyclopédie multimédia, Atlas et organise-notes, Microsoft encarta, collection 2004.
 - [13] www.health.technologies.com/français/documentation/energie/energie.ht.
 - [14] www.ac-lille.fr/albert-ball/vent.htm.
 - [15] www.meteolafleche.com/vent.html.
 - [16] Jain Haldik, "Les objectifs scientifiques de demain" "Energétique éolienne" "Chauffage éolien" production d'électricité, pompage", Presses de l'université du Québec canada, 1984.
 - [17] G. Cuntly, "éoliennes et aérogénérateurs", guide de l'énergie éolienne, 1^{re} édition 1979, 2^{ème} édition 1982.
 - [18] Mme.Benoudjit Chalabia «Energie éolienne » mémoire de Magister, proposé par M^A.Benoudjit, Juin 2004.
 - [19] www.multimania.com/tipemaster/TIPE/Eole/Eole.html.
 - [20] www.nrel.gov/wind/animation.html.
 - [21] www.echosystème.qc.ca/eolienne.html.
 - [22] www.windpower.org/fr/tour/wtrb/electric.htm.
 - [23] www.eduscol.education.fr/D0110/energies_renouvelables.pdf.
-

- [24] A. Madoui et K. Heddane «Etude et Réalisation d'une éolienne » mémoire de fin d'études, Université de Batna 2005.
 - [25] [www. Cancern.gc.ca/earth/index_f.asp](http://www.Cancern.gc.ca/earth/index_f.asp).
 - [26] Salma El Aimani, "Modélisation de différentes technologies d'éolienne intégrées dans un réseaux de moyenne tension", Thèse de Doctorat, l'université des sciences
 - [27] Frédéric Poitiers,"Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne". Thèse de Doctorat,l'niversité de Nantes,19 décembre 2003.
 - [28] Adam Mirecki, " Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance".Thèse présentée pour obtenir le titre de: Docteur de l'université de polytechnique de Toulouse.
 - [29] R. Abdessemed, M. Kadjoudj,"Modélisation des machines électriques"; Presse de l'université de Batna Edition 1997.
-