



REPOBLIKAN'I MADAGASIKARA

Fitiavana – Tanindrazana – Fandrosoana



---

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

---

UNIVERSITE D'ANTSIRANANA

---

ECOLE NORMALE SUPÉRIEURE POUR L'ENSEIGNEMENT TECHNIQUE

---

DEPARTEMENT : **GENIE ELECTRIQUE**

---

---

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE D'OBTENTION DU DIPLOME C.A.P.E.N

---

---

**ETUDE DE FAISABILITE D'UNE ALIMENTAION AUTONOME EN  
ENERGIE EOLIENNE DE L'UNA**

---

Réalisé par :

**DRAFENO Gérald**

Encadreurs :

M.RABE TSIROBAKA;  
M.TSIMA Aristol.

Promotion :

**HENJANA**

*Humbles Etudiants Normaliens Jeunes Actifs et Novateurs pour l'Avenir*

- Février 2011 -

Département d'ELECTRICITE

Année universitaire : 2010

Filière : GENIE ELECTRIQUE

**SUJET DE MEMOIRE**

**TITRE :**

**ETUDE DE FAISABILITE D'UNE ALIMENTATION AUTONOME EN ENERGIE EOLIENNE DE  
L'UNA**

**(01 ETUDIANT PETGES)**

**Introduction :**

A Antsiranana, on constate que le vent nommé Varatraza souffle presque pendant toute l'année ; on peut exploiter cette énergie du vent pour avoir une énergie électrique non polluante. L'Université dépense chaque année des valeurs très grandes pour l'énergie de JIRAMA.

Suivant la disposition des matériels et technologies existant maintenant, on peut croire que l'Université d'Antsiranana peut créer et faire fonctionner une centrale éolienne autonome.

**Travaux demandés :**

- Chercher les données météorologiques de la ville d'Antsiranana,
- Donner la notion générale sur les éoliennes autonomes,
- Chercher les données de la charge électrique de l'UNA (y compris le nouveau bâtiment),
- Identifier le type de machine adapté pour cette charge,
- Donner les caractéristiques des pales utilisées,
- Citer les avantages et inconvénients de votre choix,
- Modéliser le système et donner les courbes caractéristiques et les paramètres de machine adaptée,
- Interpréter les résultats et commenter,
- Donner le coût de l'installation,
- Conclure.

**Encadreurs :**

M.RABE TSIROBAKA;

M.TSIMA Aristol.

*Gérald DRAFENO*

*PETGES /2010*

## REMERCIEMENTS

**“ Tout d’abord, je tiens à remercier notre Dieu le créateur tout puissant, de m’avoir donné force, courage et santé. A lui seul reviennent la gloire, la louange et l’honneur par les siècles des siècles. Amen ! ”**

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à tous ceux qui ont de près ou de loin, rendu possible ce travail. Spécialement mes deux encadreurs :

- Monsieur RABE Tsirobaka, enseignant chercheur de l’UNA et
- Monsieur TSIMA Aristol, qui ont proposé ce sujet et qui ont bien voulu me diriger durant cette étude, pour tout ce qu’ils ont fait pour moi et, en particulier, l’encadrement fort utile dont j’ai bénéficié tout au long de ce travail.

Que Madame le Président de jury ainsi que tous les membres de jury qui vont porter leur jugement à ce modeste œuvre, reçoivent mes vives reconnaissances.

J’adresse également mes sincères remerciements à tous les enseignants, ainsi qu’à tous les membres de personnel administratif qui ont bien manifesté leur dévouement dans cet établissement dans lequel j’ai traversé mes cinq années d’études.

Un grand merci à toute ma famille et plus particulièrement à mon père, ma mère et mes deux sœurs pour m’avoir soutenu spirituellement, moralement et financièrement tout au long de mes études.

Enfin, merci à tous mes amis et mes collègues de promotion “HENJANA “ qui ont su créer une atmosphère fraternelle durant nos études.

Merci à tous !

*Gérald DRAFENO.*

## NOTATIONS ET SYMBOLES :

$C_p$  : coefficient de puissance aérodynamique ;

$C_t$  : coefficient du couple ;

$\rho$  : masse volumique de l'air en [Kg/m<sup>3</sup>] ;

$S_b$  : surface balayée par la pôle en [m<sup>2</sup>] ;

$\lambda$  : vitesse spécifique du générateur en [m/s] ;

$P_{max}$  : puissance maximale fournie par l'éolienne en [W] ;

$D$  : diamètre de la pale en [m] ;

$V$  : vitesse du vent en [m/s] ;

$R$  : rayon de la turbine ;

$\Omega$  : vitesse de rotation du générateur en [tr/s] ;

$P_{aé}$  ou  $P_t$  : puissance aérodynamique ;

$P_{élec}$  : puissance électrique ;

$\eta_E$  : Rendement électrique du générateur ;

$\alpha$  (alpha) : Coefficient caractéristique du lieu ;

$\beta$  (beta) : angle d'orientation des pales ;

$v_0$  : vitesse observée à l'altitude  $h_0$  de référence au-dessus du sol ;

$P_{as}$  : pression partielle de l'air sec en [Pa] ;

$P_v$  : pression partielle de vapeur d'eau en [Pa] ;

$V$  : volume occupé par l'air humide et aussi par la vapeur d'eau en [m<sup>3</sup>] ;

$m_{as}$  : masse correspondante de l'air sec en [Kg] ;

$m_v$  : masse de vapeur d'eau dans l'air humide en [Kg] ;

$f(V_x)$  : fonction de la densité de probabilité de Weibull ;

$p(V_x)$  : probabilité de répartition du vent de Weibull ;

$K$  : facteur de forme ;

$C_0$  : facteur d'échelle ;

$V_{\text{dém}}$  et  $V_{\text{cou}}$  : respectivement la vitesse de démarrage et la vitesse de coupure de l'éolienne ;

$P_n$  : Puissance nominale absorbée [W] ;

$U$  : tension de service [V] ;

$S_n$  : puissance apparente absorbée [VA] ;

$K_U$  : facteur d'utilisation des appareils ;

$K_S$  : facteur de simultanéité ;

$K_e$  : facteur d'extension ;

$I_n$  : courant nominal absorbé par les récepteurs [W] ;

$I_B$  : courant maximal d'emploi [A] ;

$V_s$  : la tension de phase au stator ;

$g$  : glissement de la machine ;

$I_s$  : le courant statorique ;

$I'_r$  : le courant rotorique ramené au stator ;

$I_o$  : courant à vide ;

$X_s, X'_r$  : les réactances de fuite ;

$X_h$  : réactance principale ;

$R_s$  : résistance de l'enroulement statorique ;

$R'_r$  : résistance de l'enroulement rotorique ramenée au stator ;

$R$  : la résistance du circuit ;

$\psi$  : le flux totalisé du circuit ;

$L_s, L_r$  : inductances cycliques statorique et rotorique ;

$l_s, l_r$  : inductances propres d'une phase statorique et rotorique ;

$m_s$  et  $m_r$  : inductances mutuelles entre deux phases statoriques et deux phases rotoriques ;

$\Omega_s, \Omega$  : vitesses angulaires du champ tournant et du rotor ;

$M$  : inductances mutuelles entre le stator et le rotor ;

$d$  : axe direct ;  $q$  : axe transversal ; et  $o$  : axe homopolaire ;

$[P]$  : matrice de Park » ;

$\theta_s$  : l'angle pour le stator et  $\theta_r$  celui pour le rotor ;

$\sigma$  : coefficient de Blondel ;

$T_{em}$  : couple électromagnétique ;

$T_r$  : couple résistant ;

$p$  : nombre de paires de pôles ;

$J$  : moment d'inertie totale (inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et l'inertie de génératrice).



## INTRODUCTION GENERALE

A nos jours, l'énergie électrique est un élément crucial pour tout développement socio-économique. En effet, quel appareil domestique ou industriel n'utilise pas d'électricité, que ce soit pour faire de l'éclairage, du chauffage, des mouvements de translation ou de rotation, et bien d'autres choses encore ? C'est pour cela que la production de l'énergie électrique est importante et qu'il est intéressant de pouvoir trouver des solutions afin d'en produire toujours plus mais de manière plus propre et plus durable. Actuellement, il ya principalement deux façons possibles d'agir.

La première est de diminuer la consommation des récepteurs d'énergie et d'augmenter la productivité des centrales énergétiques en améliorant respectivement leur efficacité, mais cela amènerait à l'épuisement immédiate des ressources énergétiques traditionnellement d'origines principalement fossiles, qui ne peuvent exploiter que pour quelques décennies, ce qui laisse présager une situation de pénurie énergétique au niveau mondiale de façon imminente, mais aussi le dégagement des gaz à effet de serre (GES) par ces centrales est un menace catastrophique pour l'humanité.

Une deuxième méthode consiste à trouver et développer de nouvelle source d'énergie telle que les ressources en énergie renouvelable inépuisable, que nous sommes en mesure d'exploiter de plus en plus facilement et proprement. On désigne aujourd'hui par énergies renouvelables un ensemble de filières diversifiées dont la mise en œuvre n'entraîne en aucune façon l'extinction de la ressource initiale.

Madagascar dispose d'énormes ressources d'énergie essentiellement renouvelables (hydraulique, solaire, éolienne...), mais la consommation énergétique globale reste encore très faible. Pour l'Electricité, les infrastructures sont insuffisantes et une grande partie des installations de production et de distribution existantes sont vétustes et ne pourraient plus satisfaire la demande croissante actuelle, alors que le prix de vente de l'énergie produite ne cesse d'augmenter, ce qui fait que les investisseurs n'installent plus leurs sociétés dans notre ville ou tout simplement les grands consommateurs n'arrivent plus à payer leurs factures, c'est le cas de l'UNA. Face à ces grands problèmes et étant donné la disponibilité du potentiel éolien qui n'est pas encore exploité dans notre région, certains enseignants chercheurs ont décidé de proposer un excellent sujet de mémoire intitulé "ETUDE DE FAISABILITE D'UNE ALIMENTATION AUTONOME EN ENERGIE EOLIENNE DE L'UNA". Ce présent travail a pour but d'analyser le potentiel du vent existant, de réduire la dépense de l'UNA en énergie, de faire une analyse technico-économique si une telle installation autonome existe, mais aussi d'analyser et simuler un système de production éolienne.

Dans le premier chapitre, on va parler des généralités sur la production éolienne.

Le deuxième chapitre sera consacré au contexte d'un projet de centrale éolienne à l'UNA.

Puis le troisième chapitre est basé sur l'évaluation du coût d'installation.

La modélisation et simulation du système de production sera étudié dans le quatrième chapitre.

Enfin, en tant qu'étudiant normalien, dans le dernier chapitre, nous mettons notre attention sur l'implication pédagogique du sujet.

## CHAPITRE I - GENERALITE SUR LA PRODUCTION EOLIENNE

### 1-1- Généralité:

#### 1-1-1. Historique de l'énergie éolienne :

Depuis l'Antiquité, des moulins à vent convertissent l'énergie éolienne en énergie mécanique (généralement utilisée pour moudre du grain, presser des produits oléifères, battre le fer, le cuivre, le feutre ou les fibres du papier... ou relever de l'eau). De nos jours, on trouve encore des éoliennes couplées à des pompes à eau, généralement utilisées pour assécher des zones humides ou au contraire irriguer des zones sèches ou abreuver du bétail.

En 1888, Charles F. Brush construit une petite éolienne pour alimenter sa maison en électricité, avec un stockage par batterie d'accumulateurs. La première éolienne « industrielle » génératrice d'électricité est développée par le Danois Poul La Cour en 1890, pour fabriquer de l'hydrogène par électrolyse.

Georges Darrieus Ingénieur français en aéronautique, fut l'inventeur de l'éolienne à axe vertical et a breveté la conception en 1927. La compagnie américaine FloWind fabriqua l'éolienne jusqu'à sa faillite en 1997. L'éolienne de Darrieus est caractérisée par ses pales de rotor en forme de C qui la font ressembler un peu à un fouet à œufs. Elle est normalement construite avec deux ou trois pales.

Johannes Juul, ingénieur électricien et ancien élève de La Cour, fut le premier à mettre au point une éolienne moderne capable de produire du courant alternatif. En 1956-1957, il conçut et construisit la plus grande éolienne du monde, la "turbine de Gedser " de 200 kW qui fonctionna pendant onze ans et devint le modèle de référence pour le développement futur de tous les autres aérogénérateurs (éoliennes équipées d'un générateur électrique). Elle fut remise en marche trois ans durant à partir de 1977 à la demande de la NASA, dans le cadre de ses projets dans le domaine des grandes turbines électriques.

Mais, l'énergie éolienne fut complètement négligée pendant l'ère industrielle, au profit quasi exclusif, si l'on excepte l'hydroélectricité, les énergies fossiles, etc. Mais, de nos jours, on la transforme en énergie électrique par l'emploi d'aérogénérateurs. Le nouvel intérêt porté à l'énergie éolienne résulte de deux préoccupations : d'une part, la protection de l'environnement et l'économie des combustibles fossiles qui en résulte. D'autre part, l'évolution des technologies rend la conversion de cette énergie de plus en plus rentable et donc son utilisation devient économiquement compétitive par rapport aux sources traditionnelles de même puissance.

#### 1-1-2. Développement de l'énergie éolienne :

Depuis ces dernières années, la production d'électricité par l'énergie éolienne s'est considérablement développée dans le monde entier (Figure 1.1). Ceci est dû principalement à deux raisons :

- Produire une énergie propre,
- Trouver une source d'énergie durable alternative aux combustibles fossiles.

Au début de l'année 2009, on estimait à peu près de 121 gigawatts la puissance totale installée de l'ensemble des éoliennes à travers le monde. Le pays possédant la plus grande puissance éolienne installée était les États-Unis (25 388 MW début 2009) suivis par l'Allemagne (23 903 MW), l'Espagne (16 740 MW), la Chine (12 200 MW), l'Inde (9 645 MW) et, loin derrière, l'Italie (3 736 MW) et la France (3 387 MW).

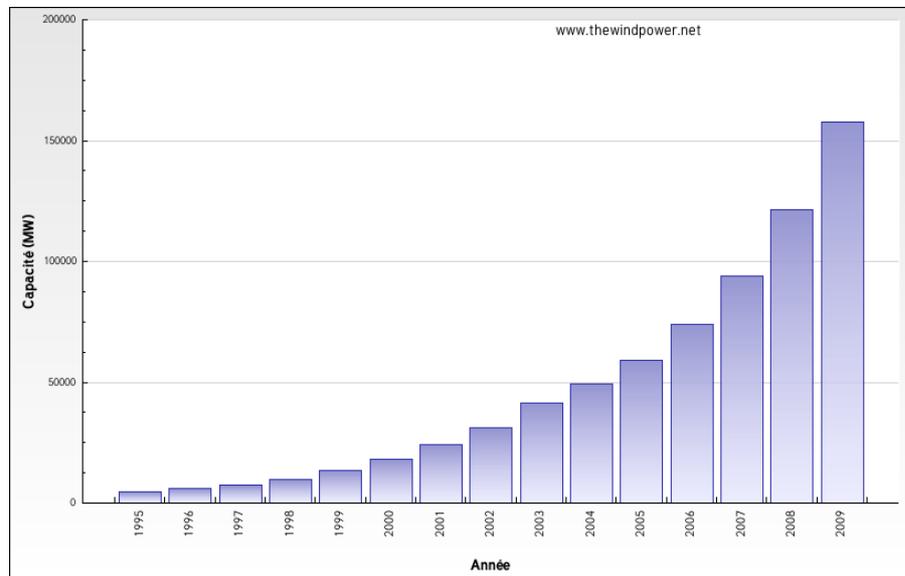


Figure1. 1.Evolution de puissances éoliennes installées dans le monde en MW

### 1-1-3. Taille des aérogénérateurs :

Avec le développement récent et le besoin de fournir des puissances croissantes au réseau, les constructeurs et les chercheurs mettent au point des éoliennes de plus en plus puissantes et donc plus grandes (Figure1.2). Pour utiliser le maximum de la force du vent, on cherche à ce que l'hélice balaie une surface où le vent est maximum. Pour cela les éoliennes sont très haut perchées pour ne pas subir les effets de sol qui freinent le vent.

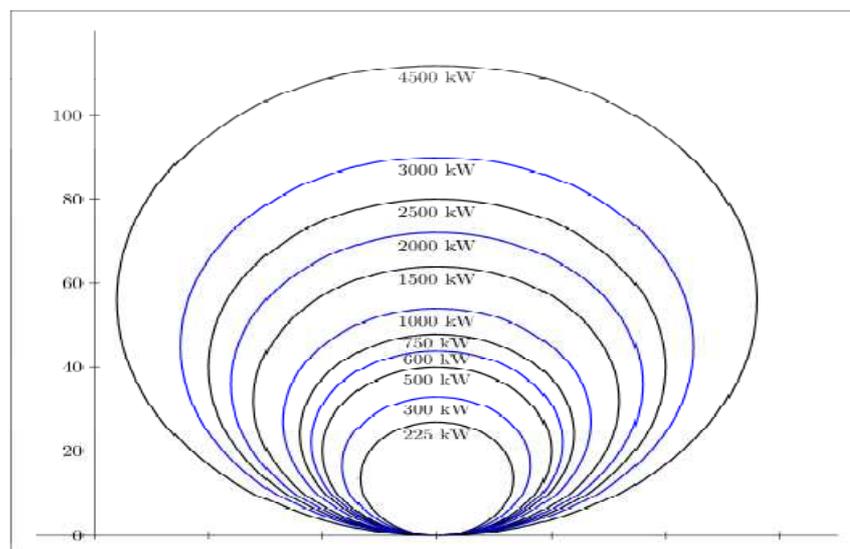


Figure1. 2.Taille des hélices en m et puissances en KW

## 1-2- Conversion de l'énergie éolienne :

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique (Figure1.3). Ses différents éléments sont conçus pour maximiser sa conversion énergétique et, d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable.

Pour parvenir à cet objectif, idéalement, une éolienne doit comporter :

- Un système qui permet de la contrôler mécaniquement (orientation des pâles, de la nacelle).
- Un système qui permet de la contrôler électriquement (machine électrique associée à l'électronique de commande).

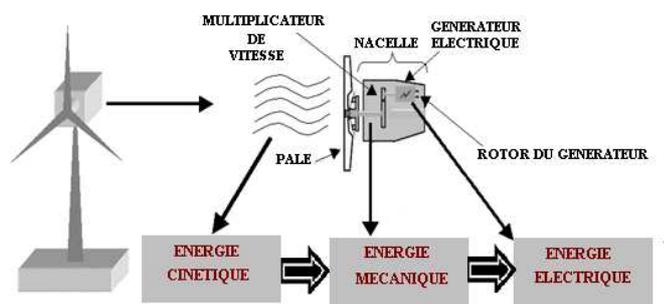


Figure1. 3. Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique

### 1-2-1. Descriptif d'une éolienne :

En général, une éolienne est constituée par **une tour** au sommet de laquelle se trouve **la nacelle**. Etant donné que la vitesse du vent augmente lorsque l'on s'éloigne du sol. La tour a la forme d'un tronc en cône où, à l'intérieur, sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, les appareillages de connexion au réseau de distribution ainsi que l'échelle d'accès à la nacelle. La nacelle regroupe tout le système de transformation de l'énergie éolienne en énergie électrique et divers actionneurs de commande. Un dispositif oriente automatiquement la nacelle face au vent grâce à une mesure de la direction du vent effectuée par une girouette située à l'arrière de la nacelle.

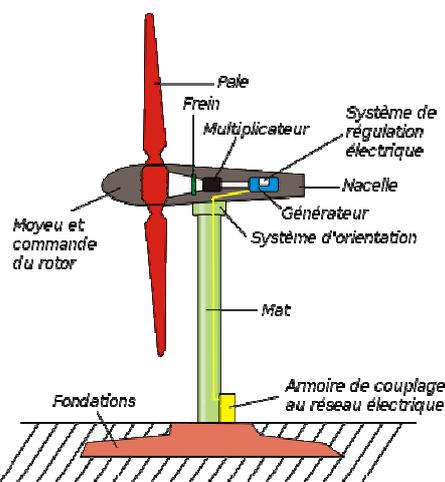


Figure1. 4. Éléments constitutifs d'une éolienne

**La turbine** éolienne est munie de pales fixes ou orientables et tourne à une vitesse nominale de 25 à 40 [tr/mn]. Plus le nombre de pales est grand, plus le couple au démarrage sera grand et plus la vitesse sera petite. Les turbines uni et bipales ont l'avantage de peser moins mais elles produisent plus de fluctuations mécaniques. Elles ont un rendement énergétique moindre, et sont plus bruyantes puisqu'elles tournent plus vite.

Elles provoquent une perturbation visuelle plus importante de l'avis des paysagistes. De plus, un nombre pair de pales doit être évité pour de raison de stabilité. En effet, lorsque la pale supérieure atteint le point extrême, elle capte la puissance maximale du vent. A ce moment, la pale inférieure traverse la zone abritée du vent par la tour. Cette disposition tend à faire fléchir l'ensemble de la turbine vers l'arrière. Ceci explique pourquoi 80% des fabricants fabriquent des aérogénérateurs tripales. Lorsque des pales fixes sont utilisées, **un dispositif de freinage aérodynamique** est utilisé permettant de dégrader le rendement de la turbine au-delà d'une certaine vitesse (décrochage aérodynamique ou stall control). Si non un mécanisme d'orientation des pâles permet la régulation de la puissance et un freinage (réglage aérodynamique). Un arbre dit « lent » relie le moyeu au multiplicateur et contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.

**Un multiplicateur** adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique utilisé. Ce multiplicateur est muni d'un frein mécanique à disque actionné en cas d'urgence lorsque le frein aérodynamique tombe en panne ou en cas de maintenance de l'éolienne. Le système de refroidissement comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur.

Il existe certaines éoliennes comportant un refroidissement à l'eau. La génératrice (ou alternateur) est généralement asynchrone, et sa puissance électrique est variable.

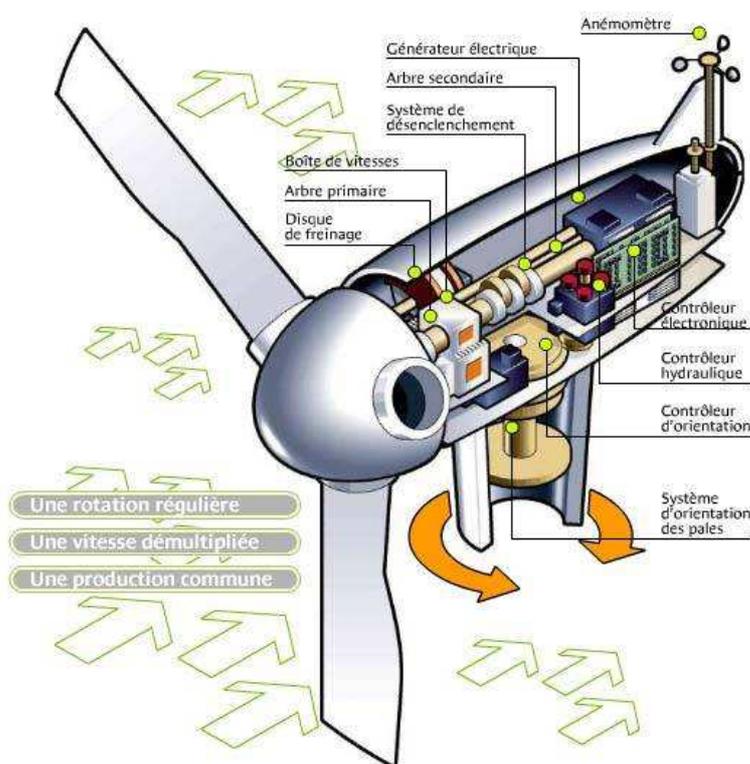


Figure1. 5. Vue éclatée d'une éolienne

1-2-2. Principe de fonctionnement d'une éolienne :

Les pales de la machine ont un mouvement de rotation autour du moyeu de l'éolienne et extraient l'énergie cinétique du vent incident. Les pales sont déterminées par des critères aérodynamiques et de profils utilisés sur structure, et ils sont assemblés entre le moyeu et le bout de la pale avec des angles de calage décroissant. Pour la plupart des éoliennes, l'énergie extraite du vent est par l'intermédiaire d'une boîte de vitesse tandis que la transmise à la génératrice vitesse de rotation de l'arbre est imposée par les caractéristiques du générateur et par le réseau distributeur d'électricité. Dans ce cas, la vitesse de rotation de la pale est constante. Toutefois, pour optimiser le rendement de l'éolienne à toutes les vitesses de vent, certaines éoliennes modernes fonctionnent à vitesse de rotation variable et le moyeu de l'éolienne est directement reliée à la génératrice. L'ensemble du système convertisseur d'énergie est finalement placé dans la nacelle, qui soutient aussi les dispositifs de freinage, de variation de l'angle de calage global de la pale, etc.

1-2-3. Type d'aérogénérateurs :

En général, il existe deux grands types d'aérogénérateurs :

a. Aérogénérateur à axe vertical :

Pour ce type d'aérogénérateur, les organes de commande et le générateur se reposent sur le sol ; donc il ne nécessite pas la construction d'un tour et elle fonctionne quelle que soit la direction du vent. Mais le fait que la génération électrique se trouve au niveau du sol implique qu'elle se situe dans un endroit défavorable (gradient du vent, turbulence due aux accidents de terrain en amont de l'éolienne). Et avec une éolienne de grande puissance, il faut occuper une grande surface du sol. Trois variantes sont très utilisées pour ce type d'éoliennes :

Une variante au rotor de Savonius basée sur le principe de la "trainée différentielle" utilisée dans les anémomètres : le vent exerce sur chacune des faces d'un corps creux des efforts d'intensité différente, alors il se produit un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble (Figure 1.6).

Il y a aussi les éoliennes à variation cyclique d'incidence dont la structure la plus répandue est celle de Darrieus : les turbines Darrieus classiques ou à pales droites. Leur fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles (Figure 1.7), est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. La combinaison de ces forces génère un couple moteur. Le couple de démarrage de ce type d'éoliennes est proche de zéro, un système de lancement est donc nécessaire : très souvent une petite turbine Savonius est présente sur son axe pour amorcer le démarrage ou bien on utilise la génératrice électrique en mode moteur.

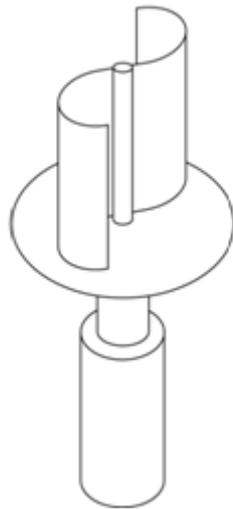


Figure1. 6.Rotor de Savonius

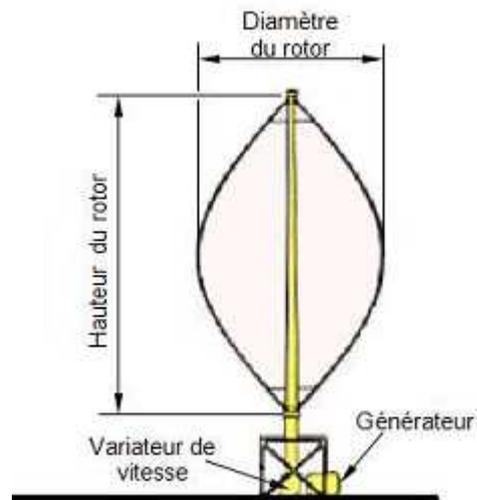


Figure1. 7.Type de rotor de Darrieus

b. Aérogénérateur à axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal sont des éoliennes dont la génération électrique se repose sur un tour de quelques mètres de hauteur. Elles sont conçues à partir du principe du moulin à vent mais en utilisant des éléments voisins des ailes d'avion. Elles présentent généralement un nombre de pales compris entre 1 et 3 ; et elles sont les plus utilisées actuellement. Deux structures peuvent être rencontrées :

➤ Les éoliennes "amont" : les pales sont en amont du tour exposé au vent. En effet, l'écoulement de l'air sur les pales est moins perturbé par la présence de la tour. Cependant la structure en amont exige des pales rigides pour éviter tout risque de collision avec la tour et l'éolienne doit être généralement orientée à l'aide d'un dispositif spécifique (Figure 1.8).

➤ Les éoliennes "aval" : cette fois les pales sont en aval de la tour. Elles permettent l'utilisation des pales plus flexibles et théoriquement auto-orientables ; mais l'effet de masque est considérable pour cette configuration (Figure 1.9).

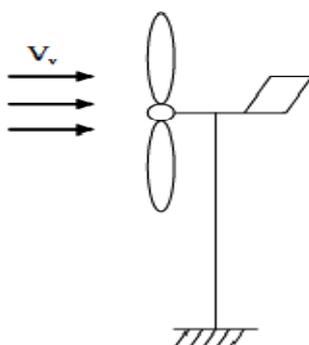


Figure1. 8.Eolienne " amont "

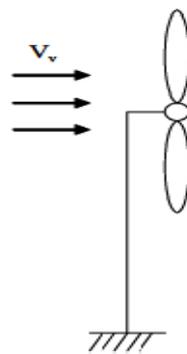


Figure1. 9.Eolienne "aval "

1-2-4. Différents types d'éolienne :

1-2-4-1. Systèmes non connectés au réseau :

Les systèmes de petite taille, non connectés au réseau, peuvent être autonomes, s'ils ne fournissent que l'électricité provenant de la conversion de l'énergie éolienne, ou hybride, s'ils fournissent de l'électricité provenant de l'énergie éolienne ainsi que d'une autre source qui remédie au manque de vent ;

Les systèmes autonomes peuvent fournir de l'énergie éolienne mécanique ou électrique et ils sont souvent équipés d'un dispositif qui stocke l'énergie pour la restituer lorsque les conditions de vent sont défavorables. Une génératrice commandée par un système éolien peut produire de l'électricité qui sera stockée dans des batteries ; mais si le propriétaire est disposé à se satisfaire d'un approvisionnement incertain, ces batteries ne sont pas nécessaires.

Les systèmes éoliens mécaniques sont relativement simples. On les utilise pour pomper l'eau destinée au bétail, pour l'irrigation et le drainage et pour approvisionner en eau les ménages, les fermes et les petites communautés. Pour stocker l'énergie des systèmes mécaniques, on peut prévoir un réservoir. Plus d'un million de systèmes mécaniques seraient aujourd'hui en service dans le monde, et la plupart d'entre eux seraient utilisés dans des fermes.

Les systèmes hybrides sont utiles dans les endroits où la vitesse du vent fluctue ou lorsque l'utilisateur ne veut pas que son approvisionnement en électricité soit entièrement tributaire du vent. Ainsi, ils peuvent utiliser l'appoint de l'énergie solaire ou d'une génératrice diesel. Ces systèmes peuvent alors assurer un approvisionnement fiable en énergie, quelles que soient les conditions du vent, mais ils sont parfois coûteux et compliqués.

Les systèmes hybrides sont particulièrement utiles lorsqu'on veut compenser les inconvénients d'un système de production d'énergie connu, comme le prix du carburant dans le cas d'une génératrice. Le système hybride est également utile lorsque le coût du stockage (c'est-à-dire le coût des batteries) est élevé, étant donné les fortes charges.

Les systèmes éoliens sont classés en fonction de leur puissance nominale propre, c'est-à-dire de la puissance maximale de sortie du système, par vent fort et dans des conditions idéales.

Pour simplifier la présentation, on a groupé les systèmes dans les catégories suivantes :

- Les microsystèmes : 100 watts maximum,
- Les mini systèmes : de 100 watts à 10 kilowatts,
- Petits systèmes : de 10 kilowatts à 50 kilowatts.

1-2-4-2. Systèmes connectés au réseau :

Les éoliennes connectées au réseau de distribution sont souvent en fonctionnement pour tester le potentiel du site considéré, ou appartiennent à des industriels ou des privés qui produisent leur propre électricité et revendent l'excédent au distributeur local.

Ce type de production décentralisé se rencontre de plus en plus avec le développement des primes et autres aides à la production d'énergie électrique propre. Le prix de rachat du KWh étant important, cela facilite et encourage le développement de l'éolien.

Les puissances de ces éoliennes peuvent varier, selon qu'il s'agit d'un exploitant privé ou d'industriel, de 50 kW à 4,5MW pour les plus récentes éoliennes du marché. Les amortissements qui s'étalent normalement sur 20 à 30 années sont considérablement réduits par toutes les aides. Une telle installation peut être rentable en 10 à 15 ans. Ces éoliennes fonctionnent en permanence et ont, le plus souvent, besoin d'être raccordées à un réseau puissant, dans le cas d'utilisation de génératrices asynchrones par exemple. Il n'y a pas d'unité de stockage pour ce type de production et la puissance produite fluctue beaucoup au gré du vent.

Le mode de couplage des systèmes de production éoliens, au réseau, varie suivant le type de la génératrice utilisée pour la conversion électrique de l'énergie. La génératrice soit du type asynchrone ou bien synchrone.

### a. Générateur asynchrone à cage

Les machines asynchrones à cage sont des génératrices adaptées à la production « au fil du vent » et directement connecté au réseau. Elles sont simples, faciles à fabriquer et les moins onéreuses, qui peuvent trouver leur application dans des grandes échelles de puissances. Mais quant à un système de dimension importante, la vitesse de rotation des aérogénérateurs est faible devant celle de la génératrice, on exige alors, d'insérer un multiplicateur de vitesse entre la turbine et la génératrice ou un variateur de fréquence. Les machines asynchrones à cage sont souvent associées à une batterie de condensateurs de compensation de la puissance réactive, et à un démarreur automatique progressif à gradateur ou à résistances permettant de limiter le régime transitoire d'appel de courant au moment de la connexion au réseau.

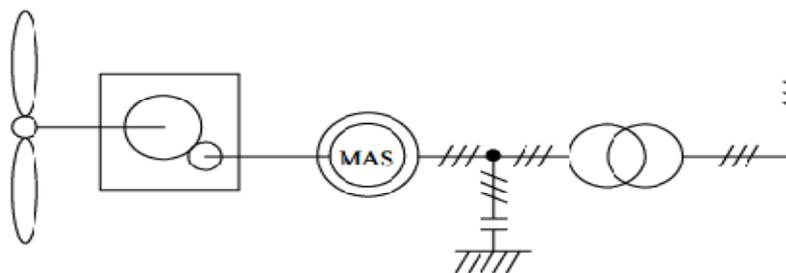


Figure1. 10.Système éolien utilisant la génératrice asynchrone à cage

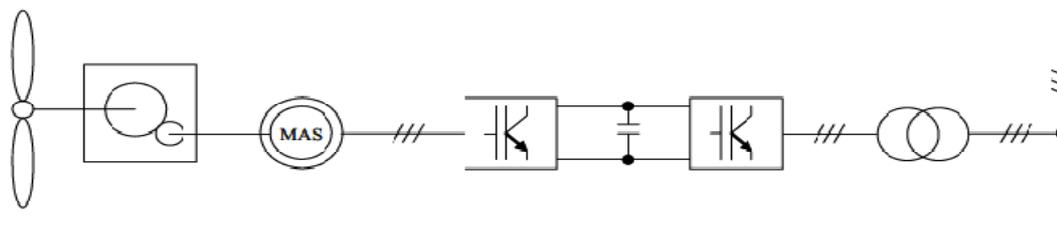


Figure1. 11.Système éolien basé sur la génératrice asynchrone à cage à fréquence variable

### **b. Génératrices asynchrones à rotor bobiné**

Dans ce cas, le système utilise la machine asynchrone à rotor bobiné et à double alimentation. Le stator est directement couplé au réseau couramment par un transformateur ; et le rotor est couplé à travers deux onduleurs MLI triphasés, l'un en mode redresseur, l'autre en onduleur réseau. Pour un tel système, le stator fournit au réseau une grande partie de la puissance, alors que la puissance du rotor est limitée à 25% de la puissance du stator. Ceci permet de concevoir un convertisseur plus petit et moins cher. Malgré cet avantage, l'existence des bagues et balais pour connecter le rotor au convertisseur demande une maintenance très importante du système. Ainsi, cette configuration est moins efficace devant le générateur asynchrone à cage avec un convertisseur de fréquence.

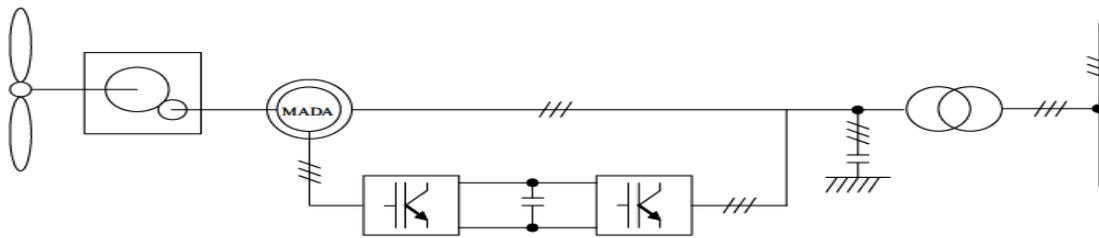


Figure1. 12.Système éolien à génératrice asynchrone à rotor bobiné

### **c. Génératrices synchrones**

Les génératrices synchrones offrent des couples très importants, elles sont particulièrement utilisées à entrainer directement les turbines éoliennes. Deux technologies sont avancées dans l'utilisation de ces génératrices :

- La machine synchrone à aimants permanents : elles possèdent de grand nombre de pôles et peuvent développer des couples mécaniques considérables. Ces machines sont dépourvues de système multiplicateur de vitesse et aussi du système bagues et balais.

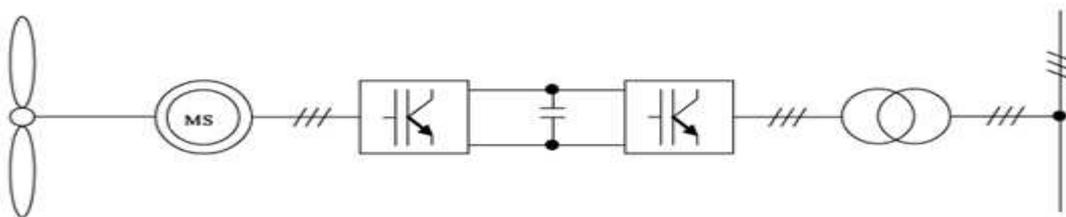


Figure1. 13.Système éolien basé sur la génératrice synchrone à aimants permanents

- La machine synchrone avec un redresseur à diodes : un redresseur à diodes est placé directement après la machine synchrone. Elle est associée à un multiplicateur de vitesse qui lui permet de fonctionner à de vitesses variables. La tension redressée sera alors convertie en tension alternative par le biais d'un onduleur MLI pour rendre possible la connexion au réseau.

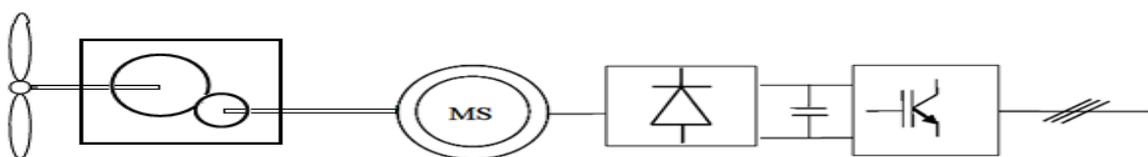


Figure1. 14.Système éolien utilisant la génératrice synchrone et un redresseur à diodes

Dans les sites de petites puissances raccordées au réseau, l'énergie électrique est tout d'abord transformée sous forme continue. La conversion de l'énergie en courant alternatif est séparée par un bus continu relié à des batteries électrochimiques. Ce bus continu offre la possibilité d'interconnecter d'autres systèmes de production tels que le système photovoltaïque. On a alors la configuration suivante :

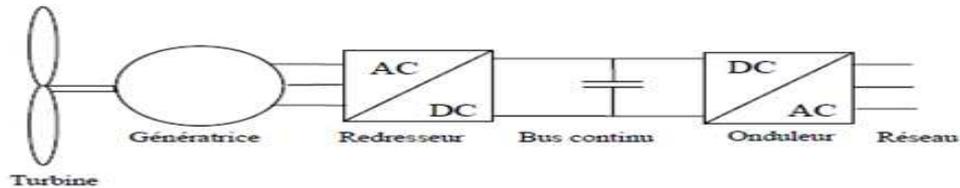


Figure1. 15.Système de production en général en petite puissance

#### 1-2-5. Théorie d'éolienne :

La production d'énergie éolienne dépend de plusieurs facteurs clés :

- Le diamètre de la zone balayée par les pales de l'éolienne (appelée « zone balayée ») : les pales d'une éolienne balayent une zone circulaire. Vu la circularité du mouvement, la puissance de l'éolienne augmente fortement en fonction du diamètre de la zone balayée. Ainsi, si on double ce diamètre, la puissance quadruple.
- La vitesse du vent : le temps pendant lequel le vent souffle à une vitesse supérieure à la vitesse d'enclenchement est un facteur critique. Il faut également savoir que de faibles augmentations de la vitesse du vent entraînent de fortes augmentations de la puissance disponible. Une augmentation de 10 p. cent de la vitesse du vent peut entraîner une augmentation de 30 p. cent de la puissance de l'éolienne
- La variabilité de la vitesse du vent sur le terrain. L'énergie totale produite par une éolienne au cours d'une certaine période dépend de la distribution et de la variabilité de la vitesse du vent pendant cette période. Il n'est donc pas étonnant que la vitesse moyenne annuelle du vent sur un terrain soit un facteur plus important que sa vitesse ponctuelle.
- La densité de l'air : la puissance du vent est directement liée à la densité de l'air, qui augmente si la température diminue (l'air chaud monte). La quantité d'énergie disponible est approximativement de 16% plus élevée à  $-20\text{ °C}$  qu'à  $+20\text{ °C}$ .
- La limite de Betz : La vitesse du vent diminue lorsqu'on en capte de l'énergie. En principe, si on retirait du vent toute énergie qu'il contient, il cesserait d'exister! Néanmoins, en réalité, il est impossible de capter toute l'énergie contenue dans le vent. Le maximum d'énergie qu'un système éolien idéal peut capter équivaut à environ 59 % de l'énergie contenue dans le vent. Cette valeur est appelée la limite de Betz.

1-2-6. Puissance fournie par une éolienne :

D'après la « Limite de Betz », à une vitesse de vent donnée, le maximum de l'énergie récupérable est de 59,3% à 70% de l'énergie totale. Dont la puissance maximale obtenue est donnée par la formule suivante :

a. Pour une éolienne à axe horizontal :

La puissance fournie par l'éolienne est donnée par la formule suivante :

$$P_{\max} = 0,29. D^2. V^3 , \quad (1.1)$$

Avec :

$P_{\max}$  : Puissance maximale fournie par l'éolienne en [W] ;

0,29 : Coefficient de Betz ;

D : Diamètre de la pale en [m] ;

V : Vitesse du vent en [m/s].

b. Pour le cas général, on a relation suivante :

Connaissant la puissance aérodynamique ( $P_{aé}$ ) du vent, on peut déduire la puissance électrique ( $P_{élec}$ ) de l'éolienne.

$$P_{aé} = \frac{1}{2} C_p . \rho . S_b . \lambda . V^3 , \quad (1.2)$$

Où :

$C_p$  : coefficient de puissance aérodynamique ;

$\rho$  : masse volumique de l'air en [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ] ;

$S_b$  : surface balayée par la pôle en [ $\text{m}^2$ ], qui peut s'écrire sous forme

$$S_b = \pi R^2 ; \quad (1.3)$$

Où R est le rayon de la turbine ;

V : vitesse du vent en [m/s] ;

$\lambda$  : vitesse spécifique du générateur en [m/s]

$$\text{avec : } \lambda = \frac{R . \Omega}{V} \quad (1.4)$$

$\Omega$  : vitesse de rotation du générateur en [tr/s].

Albert Betz a démontré que L'énergie récupérable est inférieure à l'énergie cinétique de l'air situé en amont de l'éolien, puisque l'air doit conserver une énergie cinétique résiduelle pour qu'il subsiste un écoulement. La puissance maximale récupérable est :

$$C_{p_{\max}} = \frac{16}{27} = 0.59 . \quad (1.5)$$

Alors la puissance électrique ( $P_{\text{élec}}$ ) de l'éolienne s'écrit :

$$P_{\text{élec}} = \eta_E \cdot P_{\text{aé}}, \quad (1.6)$$

$\eta_E$  : rendement électrique du générateur.

#### 1-2-7. Régulation de la puissance :

La puissance d'une turbine éolienne est fonction de la vitesse linéaire du vent. En effet, la figure suivante montre la courbe donnant les caractéristiques puissance-vitesse d'une éolienne qui se répartissent en quatre zones.

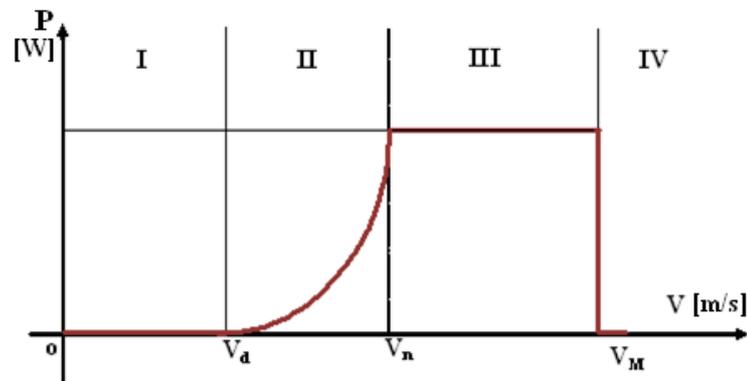


Figure1. 16.Caractéristique puissance-vitesse d'une éolienne

Zone I : la vitesse du vent est inférieure à la vitesse du démarrage de la turbine, la puissance est encore nulle.

Zone II : la puissance évolue avec la vitesse, c'est la zone d'extraction maximale de la puissance du vent.

Zone III : la vitesse atteint sa valeur nominale et maintenue constante par un dispositif de régulation ; et la puissance de la turbine est sensiblement ou égale à sa puissance nominale.

Zone IV : au-delà de laquelle la puissance générée est limitée, c'est-à-dire la turbine doit être arrêtée.

#### 1-2-8. Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne :

Par suite des fluctuations très grandes de la vitesse du vent, il est absolument nécessaire de prévoir un dispositif de régulation. En général, une éolienne doit pouvoir résister à un vent d'au moins de 40 à 50 m/s. Les solutions pour limiter les efforts, l'emballement et la puissance de la machine sont nombreuses.

Les éoliennes à marche rapide ont souvent des pales orientables. C'est donc par la variation de l'angle de calage que l'on agit. La pale est généralement appelée par un ressort (solution simple et facilement réglable), on place alors l'axe d'articulation de manière que la résultante des forces aérodynamiques crée un couple qui, à partir d'une certaine valeur, provoque la rotation de la pale. Ce dispositif répond bien au coup de vent.

Avec des pales fixes, c'est le décrochage aérodynamique qui est le plus intéressant, bien qu'il nécessite un profil assez fin et n'étant donc pas extrêmement résistant. On n'en utilise la propriété que lorsque l'angle relatif atteint une certaine valeur, le coefficient de portance décroît brusquement, ce qui limite la puissance de la machine.

Pour les grandes machines, la régulation est faite par un microprocesseur interne qui agit par l'intermédiaire de vérins hydrauliques sur le calage des pales. Les freins sont souvent aussi du type à disque commandés hydrauliquement.

En général, beaucoup de systèmes de régulation sont utilisés pour maintenir la puissance mécanique récupérée par la turbine :

- **Le pas variable** permet de modifier l'orientation des pales sur le moyeu et permet ainsi de modifier l'énergie récupérée par l'éolienne. Entre autres, il permet d'arrêter l'éolienne afin de la protéger des vents violents (en plaçant les pales en drapeau et en réduisant donc la prise au vent) ou à maximiser l'énergie absorbée par l'éolien pour la faire démarrer.
- **Le pas fixe** empêche les pales d'accélérer en utilisant l'effet Stall qui agit comme un frein par le décrochage aérodynamique au niveau de la pale du rotor.
- **Les volets** (aérofrein ou *flaps*) s'ouvrent automatiquement, si la vitesse du vent devient excessive ou si un problème est décelé, et ralentissent les pales ou diminuent leur portance en provoquant un décrochage aérodynamique.
- **Les spoilers**, encastrés dans le bord d'attaque des pales (freinage aérodynamique). Chaque spoiler est maintenu dans son logement par un ressort de rappel et une masse tarés individuellement en fonction de la position du spoiler sur le bord d'attaque de la pale. À partir d'une certaine vitesse linéaire, la force centrifuge provoque l'éjection de tous les spoilers au même moment modifiant ainsi le profil aérodynamique de la pale.

#### 1-2-9. Implantation sur un site :

##### 1-2-9.1 Choix approprié du site d'installation :

A tout endroit, plus on s'approche de la surface du sol, la vitesse du vent est moins élevée. Ceci provient de la friction avec le sol et des obstacles à la surface. Les turbulences causées par les obstacles réduiront le rendement de toute éolienne.

Par conséquent, placer l'éolienne à un endroit ayant le vent où l'écoulement d'air le plus libre, le bon rendement est possible. La puissance mécanique du vent est en fonction cubique de sa vitesse. Ceci signifie que de petites variations de vitesse de vent peuvent altérer profondément la puissance. Pour chaque doublement de la vitesse du vent, l'éolienne est capable d'octupler sa puissance de sortie. Même de légers changements ont des effets significatifs.

L'éolienne doit être montée sur un mât au moins 8 m au-dessus de tout objet alentour dans un rayon de 150 m. Si cela est impossible, placer la aussi haut que possible.

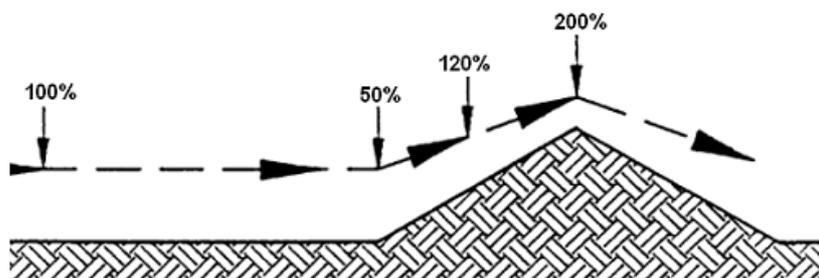


Figure1. 17.La densité de puissance en fonction du lieu d'implantation

#### 1-2-9.2 Caractéristique du vent :

Que ce soit pour valider les différents modèles de vent développés ou pour fournir une aide à la décision dans l'implantation de ces machines sur un site donné, il est nécessaire de procéder à une caractérisation du vent.

##### a. Mesures de vitesses et de directions du vent :

Au sol, en mer et en altitude, le vent est mesuré en kilomètre par heure (km/h), en mètre par seconde (m/s) ou en nœuds (kt). La mesure directe du vent se fait dans des stations météorologiques sur la terre ferme ou en mer grâce à un anémomètre (Figure1.18), qui en donne la vitesse, et une girouette, qui en donne la direction. Les anémomètres mécaniques sont formés de coupelles qui tournent autour d'un axe quand le vent souffle. Il existe d'autres versions dont celles dites à fil chaud où le changement de température d'un thermistor causé par le flux d'air correspond à la vitesse de ce dernier. On obtient par radiosondage la variation des vents avec l'altitude en suivant le mouvement d'un ballon-sonde depuis le sol. Depuis l'espace, grâce aux instruments d'un satellite météorologique, on peut obtenir les vents dans toute l'atmosphère. Ces données sont particulièrement utiles aux endroits inhabités comme les déserts et les océans.

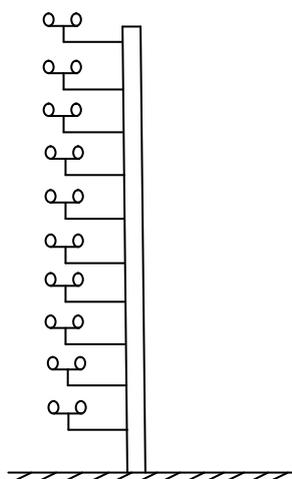


Figure1. 18.Exemple de mât de mesure

Le vent peut également être estimé par un manche à air au sol et les marins l'estiment en utilisant l'échelle de Beaufort, échelle fermée à 13 niveaux de force 0 à force 12 (Tableau 1.1), s'ils n'ont pas d'instruments pour la mesurer.

Tableau 1. 1.Effet du vent en fonction de sa vitesse

Échelle en degrés	Nature du vent	Effets physiques	Vitesse du vent Moyenne [m/s]
1	Vent insensible et très faible	La fumée monte verticalement, les feuilles semblent immobiles.	1
2	Brise infime	Imperceptible frémissement des feuilles, la fumée est légèrement déviée.	2
	Brise légère(les moulins démarrent)	Les feuilles s'agitent doucement, la fumée est nettement déviée.	3
3	Vent modéré (frais)	Les petits rameaux remuent un peu.	4
4	Vent léger	Les branchettes plient légèrement	6
	Brise moyenne (bon brise)	Les branchettes plient nettement.	7
5	Forte brise	Les branches oscillent et se balancent.	8
	Grand frais	Les branches plient.	9
	Très forte brise	Les peupliers plient.	10
6	Vent fort	Les feuilles sont arrachées.	12
7	Vent très fort	Les petites branches se cassent.	15
8	Vent impétueux	Les branches moyennes se brisent.	20
9	Fort coup de vent	Début de dégât sur les toitures.	22
10	Tempête violente	Les fortes branches se cassent.	24
11	Tempête très violente	Ravages étendus	30
12	Ouragan	Les toitures sont très endommagées.	36
	Grand ouragan	Gros arbres et les toitures sont arrachés : effet catastrophiques.	46

b. Variation de la vitesse du vent avec l'altitude :

Elle dépend essentiellement de la nature du terrain au dessus duquel se propagent les masses d'air. Au sommet d'une colline arrondie, on a un accroissement local de vitesse dont l'effet peut inverser le gradient de la vitesse habituelle et faire que la vitesse au sol soit plus grande qu'à une certaine hauteur.

En terrain plat, on peut représenter la variation de la vitesse  $v$  en fonction de la hauteur  $h$  au dessus du sol par la loi : 
$$\left(\frac{V}{v_0}\right) = \left(\frac{h}{h_0}\right)^\alpha \quad (1.7)$$

Avec :  $v_0$  étant la vitesse observée à l'altitude  $h_0$  de référence au-dessus du sol,

$V$  : vitesse observée à l'altitude  $h$  ;

$\alpha$  : Coefficient caractéristique du lieu (alpha)

Le coefficient  $\alpha$  a sensiblement les valeurs suivantes :

Tableau1. 2.Valeurs prises par les différents terrains en quatre familles

NATURE DU TERRAIN	$\alpha$
PLAT : mer, glace, neige, marécage, herbes courtes.	0,08 à 0,12
PEU ACCIDENTE (négligeable de faible altitude) : champs et pâturage, cultures.	0,13 à 0,16
ACCIDENTE : bois, zones peu habitées.	0,20 à 0,23
TRES ACCIDENTE : en ville	0,23 à 0,4

1-2-9.3 Choix du pylône :

Le pylône ou tour supporte la nacelle et le rotor de l'éolienne. Il est de conception différente selon les dimensions de l'éolienne et selon l'impact souhaité sur le paysage. On rencontre les structures de pylônes suivantes :

➤ Tour auto porteuse cylindrique :

En acier ou en béton, elle équipe la plupart des grandes éoliennes. Sa forme est conique pour augmenter la rigidité tout en minimisant le poids de la structure. Ce sont en général des sections de 20 à 30 mètres de longueur. L'ancrage au sol est important et nécessite des fondations solides.

➤ pylône en treillis métallique (Figure1.19) :

C'est une construction plus légère et moins coûteuse que la tour cylindrique pour une même résistance. Par contre, l'impact visuel est totalement différent.

De plus ce type de pylône génère beaucoup plus de perturbations aérodynamiques dans l'écoulement du vent.

➤ Mât haubané (Figure1.20) :

Pour les petites éoliennes, ceci représente une alternative intéressante. Il s'agit d'un mât de faible section soutenu par une série de haubans. Ce type de pylône coûte alors moins cher qu'un pylône classique. Par contre, l'emprise au sol plus importante peut être gênante.

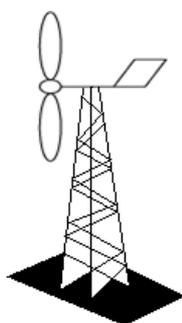


Figure1. 19.Pylône en treillis

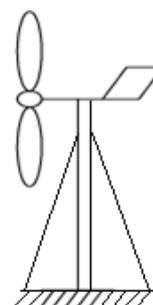


Figure1. 20.Pylône haubané

1-2-9.4 Choix du nombre de pales :

Le nombre de pales des éoliennes dépend du coefficient de puissance ( $C_p$ ) qui est fonction de la vitesse spécifique de l'aérogénérateur. La figure1.21 suivante montre un abaque explicatif:

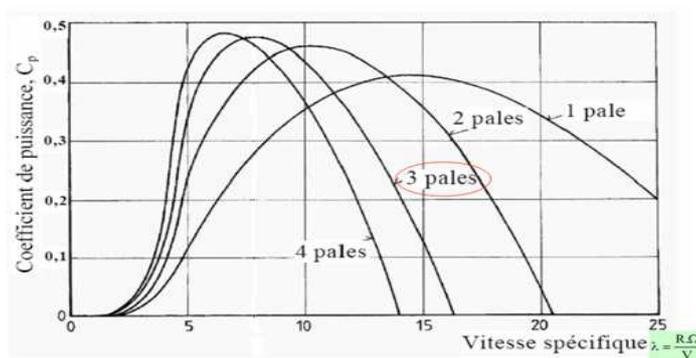


Figure1. 21.Abaque de choix du nombre de pales

1-2-9.5 Autres composants du système :

Les caractéristiques de votre application détermineront l'équipement et le matériel additionnels dont on aura besoin pour produire de l'électricité à la tension et à l'intensité requises.

On désignera l'équipement additionnel par l'appellation « Autres Composants du Système » (ACS). Les ACS les plus importants sont les batteries, l'onduleur et le générateur à carburant fossile, si vous en utilisez un. Les ACS restants sont les câbles, les interrupteurs, les disjoncteurs, les compteurs et les autres appareils qui ne sont pas nécessairement fournis par le fabricant. Vous devez avoir facilement accès aux ACS pour procéder à l'entretien des batteries et aux réparations qui s'imposent, et pour recueillir les données telles que le nombre de kilowattheures produits. Et prévoir un endroit spécial dans un atelier, un abri ou à l'intérieur de la maison pour installer les ACS.

• **Les batteries :**

On équipe un grand nombre de systèmes éoliens de batteries qui produisent de l'électricité de remplacement quand le vent n'est pas propice. Un système sans batteries produira de l'électricité que lorsque le vent soufflera assez fort pour répondre à la demande. Les batteries ne sont pas toutes fabriquées de la même manière, et la terminologie utilisée à leur sujet manque parfois de clarté (tableau 1.3). Une des plus importantes caractéristiques des systèmes éoliens est la profondeur de décharge (PDD), qui représente la quantité d'énergie sans compromettre sa recharge. Si vous extrayez toute l'énergie contenue dans une batterie, vous réduisez radicalement sa durée de vie, bien que les batteries utilisées dans les systèmes éoliens soient le plus souvent conçues pour supporter une profondeur de décharge importante. On se limite généralement à une décharge de 50p.cent, mais certaines batteries ont une PDD de 80p.cent, c'est-à-dire qu'on peut extraire 80p.cent de leur énergie sans risquer de réduire leur durée de vie. De nombreuses batteries sont munies d'un dispositif qui coupe le courant lorsque la tension devient trop faible, pour empêcher toute décharge excessive. Les systèmes éoliens peuvent recevoir de nombreux types de batteries. Les plus économiques sont habituellement les batteries au plomb à forte PDD. Les batteries d'automobiles (batterie au plomb conçues pour le démarrage, l'éclairage et l'allumage) ont une PDD trop faible et, installées dans un système éolien, elles risquent de faire défaut prématurément. Si la taille des batteries est bien choisie, celle-ci doivent avoir une durée de vie de trois à cinq ans. La durée de vie de certaines batteries de première qualité, à grandes cellules, peut atteindre 15 ans. Il est recommandé de connecté les batteries en série. Les connexions en parallèle risquent de causer des dommages en raison de la variation de charge des différentes cellules des batteries.

Tableau1. 3.Performance typique en fonction de la batterie

Technologie		Utilisation				
Types de plaques	Types d'électrolytes	Servitude	Démarrage	Décharge profonde 50%	Décharge profonde 80%	Décharge complète 100%
Plaques minces	Liquide	---	+++	---	---	---
Plaques épaisses	Liquide	++	+-	350 cycles	---	---
Plaques épaisses	AGM	+++	++	450 cycles	275 cycles	200 cycles
Plaques épaisses	Gel	+++	+	650 cycles	420 cycles	350 cycles

- **Les onduleurs :**

L'énergie stockée dans les batteries est disponible sous forme de courant continu. Certains appareils et appareils électroménagers sont conçus pour être alimentés en courant continu ; c'est le cas des appareils d'éclairage et de l'équipement utilisés dans les matériels de camping, de navigation de plaisance et dans les véhicules récréatifs, parce qu'ils sont conçus au départ pour être alimentés par batterie. Mais les appareils électroménagers que l'on utilise à la maison doivent utiliser le courant alternatif.

L'onduleur convertit le courant continu d'une batterie en courant alternatif. Le processus de conversion entraîne une perte d'énergie d'environ 10p.cent. Il existe plusieurs types d'onduleurs :

➤ Les onduleurs pour service léger (100 à 1 000 watts) sont généralement alimentés par un courant continu de 12 volts et conviennent aux ampoules d'éclairage et aux petits appareils, tels que les postes de télévision et de radio, ainsi qu'aux petits outils manuels.

➤ Les onduleurs à usage industriel (400 à 10 000 watts) peuvent être reliés à différentes tensions continues 12,24 ou 48 volts et peuvent faire fonctionner à peu près n'importe quel appareil électrique dans une maison ou un petit commerce.

Il faut également s'assurer de la qualité de l'électricité fournie par l'onduleur ; Si la documentation qui accompagne l'onduleur parle d' « onde sinusoïdale réelle » ou d'« onde sinusoïdale modifiée », l'électricité en question est de première qualité, et on peut en toute sécurité s'en servir pour alimenter les équipements électroniques sensibles comme les ordinateurs ou les imprimantes laser. Les onduleurs sont souvent des appareils très perfectionnés qui, en plus de la conversion du courant continu en courant alternatif, offrent toute une gamme d'usages. Ainsi, nombreux sont les onduleurs qui sont équipés d'un dispositif de démarrage automatique destiné à un générateur d'appoint, diesel ou essence.

- **Ensemble générateur pour systèmes hybrides :**

Si la demande d'électricité est continue et que le vent est faible pendant une période prolongée, il faut pouvoir utiliser un générateur d'appoint, qui peut fonctionner à l'essence, au carburant diesel et au propane. L'électricité produite peut être utilisée à l'endroit requis soit directement, soit indirectement si on la stocke en chargeant des batteries. Si l'on veut assurer un approvisionnement continu en électricité, on est parfois obligé d'installer un générateur à « démarrage à distance », qui mettra automatiquement en marche avant que la source d'électricité que constituent les batteries ne soit pas épuisée. C'est habituellement l'onduleur qui donne le signal de démarrage. Les générateurs ne sont pas tous conçus pour qu'on puisse les faire démarrer à distance, et les onduleurs ne peuvent pas tous faire démarrer à distance un générateur. Non seulement l'installation de générateurs engendre une dépense en capital initiale, mais il faut également prévoir les carburants que ces générateurs consomment, leur entretien périodique, leur reconditionnement et même leur remplacement. S'ils constituent une importante source d'électricité, ils sont également bruyants, ils polluent, et leur utilisation nécessite le stockage de carburants inflammables.

- **Chargeur de batterie :**

Certains générateurs peuvent charger des batteries s'ils possèdent une sortie à cet effet ; dans le cas contraire, il faut prévoir l'achat d'un chargeur de batterie. Certains onduleurs peuvent également servir à charger des batteries.

- **Redresseur :**

Le redresseur convertit le courant alternatif en courant continu. On utilise souvent les redresseurs comme appoints aux batteries dans les systèmes éoliens équipés de générateurs de courant alternatif.

- **Équipement de protection :**

L'installation de sectionneurs, de disjoncteurs, de fusibles et d'autres dispositifs de protection recommandés par le fabricant et exigés par le code de l'électricité est indispensable au fonctionnement sécuritaire du système. Ces dispositifs isolent l'éolienne des batteries, et les batteries de l'onduleur et de la charge. Ils peuvent également protéger le système contre les dommages causés par d'autres phénomènes.

- **Équipement de surveillance :**

Mêmes les plus élémentaires des ACS doivent comprendre des dispositifs qui permettent de surveiller le fonctionnement de l'équipement. L'équipement standard de surveillance comprend un voltmètre, qui permet de mesurer la tension des batteries et un ampèremètre. S'il est perfectionné, l'équipement de surveillance comprend en outre les alarmes signalant les problèmes qui surgissent, mais aussi un régulateur.

L'électronique interne du régulateur protège l'utilisateur et les batteries contre les surtensions venant de l'éolienne. Il joue aussi le rôle de contrôler la vitesse de rotation du rotor de l'éolienne et de servir le régulateur sophistiqué de charge des batteries. Le régulateur interne lit la tension des batteries et décide de continuer de chargé ou non. Dès que la tension des batteries atteint le point auquel le régulateur est réglé, celui-ci empêche l'éolienne de les charger (Par vent fort il peut subsister un chargement intermittent.) A noter que le rendement de charge des batteries varie sous des températures extrêmes. Dans ces conditions, un régulateur externe à compensation de température peut être utilisé pour optimiser le temps de chargement. On trouve plusieurs régulateurs qui ajustent le chargement selon la température des batteries.

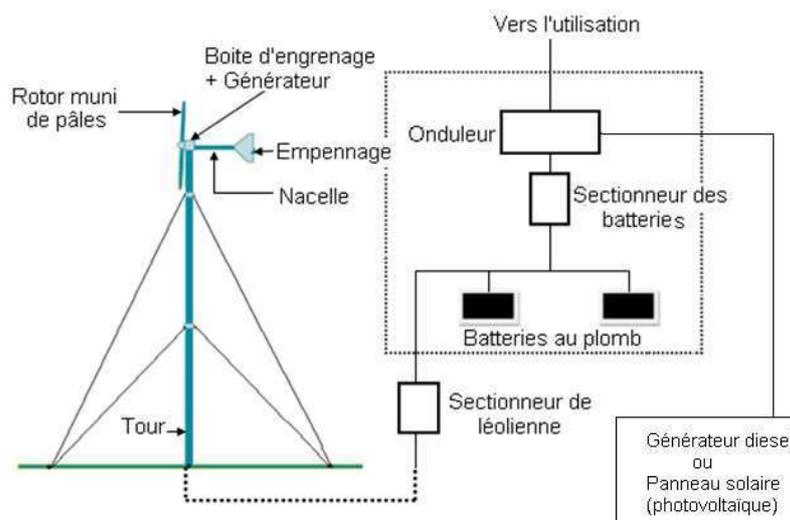


Figure1. 22.Composants d'un système éolien

## CHAPITRE II - CONTEXTE D'UN PROJET DE CENTRALE EOLIENNE A L'UNA

Le vent est une source d'énergie cinétique renouvelable qui représente un potentiel considérable dans plusieurs régions du monde. L'énergie que peuvent capter les éoliennes dépend en grand partie de la vitesse moyenne du vent à l'échelle locale. Les régions où l'on observe le potentiel le plus intéressant sont les côtes, les zones dégagées de l'intérieur ou les rives de plans d'eau. Certaines régions montagneuses présentent également un grand intérêt. Malgré les restrictions géographiques inhérentes au choix de l'emplacement des centrales éoliennes, il existe de nombreux endroits dans la plupart des régions du monde où l'énergie éolienne pourrait satisfaire une grande partie de la demande locale. C'est dans ce contexte général que nous allons voir la faisabilité d'une centrale éolienne à l'UNA, mais avant tout nous allons parler de cette source d'énergie qui est le vent.

### 2-1- Analyse technique :

#### 2-1-1. Caractéristiques du vent :

Puisque le vent est l'énergie primaire captée de l'éolienne, il est important de savoir ses caractéristiques.

#### • **L'air atmosphérique** :

L'atmosphère standard se compose de deux parties essentielles, (voir Figure 2.1), à savoir :

- La troposphère dont l'épaisseur représente 80% de la structure atmosphérique, dont la limite inférieure est le sol et la limite supérieure la tropopause. Son épaisseur est de l'ordre de 10 km ;
- La stratosphère qui représente les 20% au-dessus de la tropopause et dont la limite supérieure est l'ionosphère.

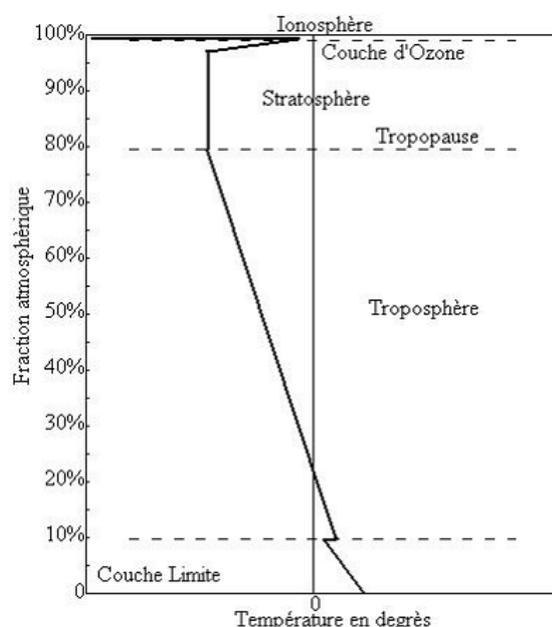


Figure2. 1. Vue schématique de la couche atmosphérique standard

L'air qui constitue l'atmosphère terrestre est un mélange de gaz et de particules solides ou liquides, concentrés dans la troposphère. Dans cette région, le déplacement de l'air, par rapport à la surface terrestre, appelé **vent** résulte de l'équilibre entre les forces en présence. Pour un observateur à l'arrêt par rapport au sol, il existe quatre forces majeures qui agissent sur une partie élémentaire d'air :

- **La force gravitationnelle** : Conséquence de l'attraction mutuelle des corps, cette force intervient à cause de la grande masse de la terre. Elle est dirigée vers le centre de la terre.
- **La force due au gradient de pression** : Dirigées des hautes pressions vers les basses pressions, ces forces sont dues au gradient de pression résultant de l'échauffement inégal de l'air suivant les latitudes, la nature des sols et la répartition des océans et des continents. Les forces de pressions sont à l'origine du déplacement des masses d'air.
- **La force de Coriolis** : Cette force est le résultat de la rotation de la terre autour de son axe et est perpendiculaire à la vitesse du vent. Elle intervient dans les déplacements atmosphériques en raison de la faiblesse des forces contribuant à mettre l'air en mouvement.
- **et Les forces de frottement** : Ces forces traduisent la friction turbulente de l'air avec le sol. Elles interviennent dans la couche limite atmosphérique. La force gravitationnelle et la force du gradient de pression sont les deux forces qui peuvent initier un mouvement de l'air. Leurs actions se font ressentir près du sol dans une zone appelée couche limite atmosphérique.

L'air atmosphérique est donc le facteur essentiel de notre environnement intérieur et extérieur. Il est composé d'un certain nombre de gaz, de vapeur, de poussière et de bactéries ; c'est l'air humide pollué qui est capté directement par les pales de l'aérogénérateur.

On dit air sec : l'air pur ne contenant aucune poussière ou bactérie, et totalement dépourvu de vapeur d'eau.

On dit air humide : l'air pur ne contenant aucune poussière ou bactérie, mais ayant une certaine teneur en vapeur d'eau.

La composition de l'air est donnée dans le tableau suivant :

Tableau2. 1.Composition de l'air sec

Constituants	Composant volumique en %
Azote [N <sub>2</sub> ] : 23	78,09
Oxygène [O <sub>2</sub> ] : 32	20,84
<u>Impuretés :</u> -Gaz carbonique [CO <sub>2</sub> ] -Oxyde de carbone [CO] -Anhydride sulfureux [SO <sub>2</sub> ] - Anhydride sulfurique [SO <sub>3</sub> ]	Variable
<u>Gaz rare :</u> Argon [Ar] : 40 Xenon [Xe] Krypton [Kr] Helium [He]	0,93  Trace

L'air humide est un mélange d'air sec et d'humidité. L'humidité de l'air se présente sous forme de :

- Vapeur d'eau ;
- Gouttelettes d'eau en suspension dans l'air (brume, brouillard, pluie) ;
- de particules de glace (givre, neige).

• **Masse volumique de l'air humide :**

La masse volumique ou densité de l'air humide est la masse d'air sec et d'humidité par unité de volume d'air humide ; on peut écrire :

$$\rho = \frac{m_{as}+m_v}{V} = \frac{m_{as}}{V} + \frac{m_v}{V} = \rho_{as} + \rho_v \text{ [Kg/m}^3\text{]} \quad (2.1)$$

Où:

$$\rho = \frac{P_{as}}{287T} + \frac{P_v}{462T} \text{ [Kg/m}^3\text{]} \quad (2.2)$$

Où:

- $P_{as}$ : pression partielle de l'air sec en [Pa] ;
- $P_v$ : pression partielle de vapeur d'eau en [Pa] ;
- $V$ : volume occupé par l'air humide et aussi par la vapeur d'eau en [ $\text{m}^3$ ] ;
- $m_{as}$ : masse correspondante de l'air sec en [Kg] ;
- $m_v$ : masse de vapeur d'eau dans l'air humide en [Kg].

L'important ici est de savoir que plus l'air est dense, plus l'énergie captée est bonne.

2-1-2. Origine du vent :

Du fait que la terre est ronde, le rayonnement solaire absorbé diffère aux pôles et à l'équateur. En effet, l'énergie absorbée à l'équateur est supérieure à celle absorbée aux pôles. Cette variation entraîne une différence de température en deux points qui induit des différences de densité de masse d'air provoquant leur déplacement d'une altitude à une autre. Ces déplacements sont influencés par la force de Coriolis qui s'exerce perpendiculairement à la direction du mouvement vers l'est dans l'hémisphère nord et vers l'ouest dans l'hémisphère sud. On pourrait aisément prévoir la direction des vents dominants s'ils n'étaient pas perturbés par les orages, les obstacles naturels ou les dépressions cycloniques.

• **Distribution de la vitesse du vent :**

De part la forme des nuages de points obtenus, les études de modélisation de la distribution des vitesses du vent ont été orientées vers des modèles associant puissance et exponentielle. Les modèles usuels étant :

- la distribution de Weibull ;
- la distribution hybride de Weibull ;
- et la distribution de Rayleigh.

**La distribution de Weibull :**

Cette distribution est souvent utilisée en génie énergétique éolien, car elle correspond bien à la distribution des vitesses du vent observée à long terme sur un grand nombre de sites.

Dans certains cas, le modèle utilise également la distribution de Rayleigh de la vitesse du vent, qui est un cas particulier de la distribution de Weibull, avec un facteur de forme (décrit ci-dessous) égal à 2.

La fonction de la densité de probabilité de Weibull représente la probabilité  $f(v_x)$  d'avoir une vitesse du vent  $V_x$  pendant l'année, comme le montre l'expression suivante (Hiester et Penell, 1981) :

$$f(v_x) = \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{v_x}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp \left[-\left(\frac{v_x}{c}\right)^k\right] \quad (2.3)$$

Cette expression est valable pour  $K > 1$ ,  $V_x \geq 0$  et  $C > 0$ . Le facteur de forme  $K$  est spécifié par l'utilisateur. De façon générale le facteur de forme est compris entre 1 et 3 (une grande valeur de  $K$  (2.5 à 3) indique une faible variation horaire de la vitesse moyenne des vents autour de la moyenne annuelle, alors que des valeurs de l'ordre de 1.2 à 1.5 représentent une grande variabilité des vents autour de la moyenne annuelle). Pour une vitesse moyenne de vent donnée, un faible facteur de forme indique que la distribution des vitesses du vent est relativement large de part et d'autre de la moyenne, alors qu'un facteur de forme élevé indique que la distribution des vitesses du vent est relativement étroite de part et d'autre de la moyenne. Pour une vitesse moyenne de vent donnée, un faible facteur de forme conduira normalement à une production d'énergie plus élevée.  $C_0$  est le facteur d'échelle, calculé à partir de l'équation suivante :

$$C_0 = \frac{V_m}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k_0}\right)} \quad (2.4)$$

Où  $V_m$  est la valeur moyenne de la vitesse du vent et  $\Gamma$ (gamma) est une fonction spéciale définie pour tout réel  $x > 0$  et non nul. Elle est donnée par l'expression suivante :

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

Dans la pratique, on peut utiliser directement les formules ci-après pour déterminer le facteur d'échelle :

$$C_0 = \frac{[1036 \cdot V_m]}{[1 - 0,08(V_m - 2)^{0,008}]} ; \quad (2.6)$$

Ou tout simplement :

$$C_0 \approx \frac{V_m}{0,885} ; \quad (2.7)$$

$$C = C_0 \cdot \left[\frac{H}{H_0}\right]^\alpha ; \quad (2.8)$$

$$K = K_0 + 0,03H + 0,02. \quad (2.9)$$

La valeur cumulée de la distribution ou bien la probabilité de répartition du vent de Weibull est donnée par l'expression suivante :

$$p(V_x) = 1 - \exp \left[ -\left(\frac{V_x}{c}\right)^K \right] . \quad (2.10)$$

Dans certains cas, le modèle calculera la distribution de la vitesse du vent à partir de la densité de puissance du vent au site plutôt qu'à partir de la vitesse du vent.

Les relations entre la densité de puissance du vent (DPV) et la vitesse moyenne du vent  $V_m$  sont :

$$DPV = \sum_{V_{dém}=0}^{V_{cou}} 0,5 \cdot \rho \cdot V_x^3 \cdot f(V_x) ; \quad (2.11)$$

$$V_m = \sum_{V_{dém}=0}^{V_{cou}} V_x \cdot f(V_x) ; \quad (2.12)$$

- $\rho$  est la densité de l'air et  $p(x)$  est la probabilité d'avoir une vitesse du vent  $V_x$  pendant l'année.

- **Courbe énergétique :**

La courbe énergétique permet de déterminer la quantité totale d'énergie produite par une éolienne dans une gamme de vitesses moyennes annuelles du vent.

L'utilisateur peut spécifier la courbe d'énergie en choisissant les données parmi les options suivantes : standard, personnalisée, et définie par l'utilisateur. Pour les courbes d'énergie standard et personnalisée, le modèle utilise la courbe de puissance de l'éolienne entrée par l'utilisateur et la fonction de densité de probabilité de Weibull décrite dans la formule (2.3).

Dans le cas standard et personnalisé, l'utilisateur établit la courbe de puissance de l'éolienne en fonction de la vitesse du vent par incréments de 1 m/s, entre 0 m/s à 25 m/s. chaque point de la courbe d'énergie  $E_{vm}$  est calculé par :

$$E_{V_m} = 8760 \sum_{V_{dém}}^{V_{cou}} P_{V_x} \cdot f(V_x) ; \quad (2.13)$$

Où :

- 8760, est le nombre d'heures dans une année ;
- $V_{dém}$  et  $V_{cou}$  sont respectivement la vitesse de démarrage et la vitesse de coupure de l'éolienne ;
- $P_{V_x}$ , est la puissance fournie par une éolienne à la vitesse du vent  $V_x$  (appelée encore puissance de la turbine éolienne), donnée par la formule suivante :

$$P_{V_x} = A \cdot C_p \cdot P'_{aér} ; \quad (2.14)$$

$A$  est la surface balayé par la turbine éolienne exprimée en  $m^2$  et donnée par la formule suivante :

$$A = \pi R_t^2 ; \quad (2.15)$$

•  $C_p$  est le coefficient de puissance. On peut extraire en totalité la puissance fournie par le vent ( $P_0$  ou  $P'_{aér}$ ), cela supposerait une vitesse de vent nulle après l'organe capteur. On définit le coefficient de puissance comme suit :

$$C_p = \frac{P_{V_x}}{0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot v_x^3} = \frac{P_{V_x}}{P_0} ; \quad (2.16)$$

Le coefficient  $C_p$  est variable, il est en fonction du vent  $V_x$  et de la vitesse de rotation de la turbine  $\Omega_t$ . il est souvent représenté en fonction de la ration de vitesse :

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R_t}{V_x} ; \quad (2.17)$$

$R_t$  : rayon de surface balayée en mètre. La valeur maximale théorique possible du coefficient de la puissance appelé limite de Betz est de :

$$C_{pMax} = \frac{16}{27} \approx 0,5926 \quad (2.18)$$

En réalité, cette limite n'est pas atteinte et on définit alors le rendement aérodynamique :

$$\eta = \frac{16}{27} C_{pmax} ; \quad (2.19)$$

$C_{pmax}$  étant la valeur maximale que peut prendre le coefficient de puissance. Cette valeur est associée à un ratio de vitesse nominale  $\lambda_{opt}$  pour laquelle la turbine a été dimensionnée suivant une vitesse du vent nominale  $V_n$  et une vitesse de rotation nominale  $\Omega_{tn}$ . En pratique, la valeur du maximum du coefficient de puissance approche la valeur de 0,48 avec une turbine tripale. Ce qui donne un rendement aérodynamique de 81% pour les turbines éoliennes actuelles.

Et  $P'_{aér}$  est la puissance aéraulique par unité de surface, donnée par la formule :

$$P'_{aér} = V_x \cdot P_{dyn} ; \quad (2.20)$$

$$P_{dyn} = 0,5 \rho \cdot V_x^2 . \quad (2.21)$$

$F(V_x)$  est la fonction de densité de probabilité de Weibull pour la vitesse du vent  $V_x$  calculée pour une vitesse moyenne du vent  $V_m$ .

Alors, l'énergie disponible par unité de surface est donnée par la formule suivante :

$$E'_{aér_d} = \left( \frac{8760}{2} \right) \cdot \rho \cdot \sum_{V_0}^{V_f} V_x^3 \cdot f(V_x) \cdot \Delta V ; \quad (2.22)$$

Où :  $V_0$  et  $V_f$  sont respectivement vitesses initiale et finale du vent ;

$\Delta V$  est le pas considéré.

- **Production énergétique non corrigé :**

Le calcul de la production énergétique non corrigée donne l'énergie produite par les éoliennes dans des conditions standard de température et de pression atmosphérique. Son calcul est basé sur une vitesse moyenne du vent à la hauteur du moyeu pour le site étudié.

A cause du phénomène de cisaillement du vent, la vitesse du vent à la hauteur du moyeu est habituellement plus élevée que celle mesurée à la hauteur habituelle où sont placés les anémomètres. Ce modèle utilise la loi suivante pour calculer la vitesse moyenne du vent à la hauteur du moyeu :

$$\frac{V_m}{V_{m0}} = \left[ \frac{H}{H_0} \right]^\alpha ; \quad (2.23)$$

$V_m$  est la vitesse moyenne du vent à la hauteur du moyeu  $H$ ,  $V_{m0}$  est la vitesse moyenne du vent à la hauteur de l'anémomètre  $H_0$  et  $\alpha$  est le coefficient de cisaillement du vent. Les valeurs de  $H$ ,  $H_0$ ,  $V_{m0}$  et  $\alpha$  sont spécifiées par l'utilisateur. Une fois que la moyenne annuelle de la vitesse du vent  $V_m$  à la hauteur  $H$  du moyeu est calculée, la production énergétique non corrigée  $E_u$  est simplement calculée par interpolation de la courbe d'énergie de la formule (2.13) pour la valeur de  $V_m$ .

- **Production énergétique brute :**

La production énergétique brute est l'énergie annuelle totale produite par le système éolien, avant considérations des pertes, à la vitesse du vent, à la pression atmosphérique et aux conditions de température du site étudié. Cette quantité est utilisée pour déterminer l'énergie renouvelable fournie. La production énergétique brute  $E_G$  est calculée par :

$$E_G = E_U \cdot C_H \cdot C_T ; \quad (2.24)$$

$E_U$  est la production énergétique non corrigée,  $C_H$  et  $C_T$  sont des coefficients de correction barométrique et thermique.  $C_H$  et  $C_T$  sont donnés par :

$$C_H = \frac{P}{P_0} ; \quad (2.25)$$

$$C_T = \frac{T_0}{T} ; \quad (2.26)$$

$P$  est la moyenne annuelle de la pression atmosphérique sur le site,  $P_0$  est la pression atmosphérique standard de 101,3 [KPa],  $T$  est la moyenne annuelle de la température absolue du site et  $T_0$  est la température absolue standard de 288,81 K.

- **Énergie renouvelable fournie :**

Ce modèle pour projets de centrale éolienne calcule l'énergie renouvelable fournie au réseau électrique, après prise en compte de diverses pertes. Dans les cas particuliers des applications en réseau isolé et hors réseau, la quantité d'énergie éolienne qui peut être absorbée par le réseau ou la charge est aussi prise en compte.

- **Énergie renouvelable captée :**

L'énergie renouvelable captée est égale à la quantité d'énergie produite par le système éolien, corrigée en fonction des pertes des équipements :

$$E_C = E_G \cdot C_L ; \quad (2.27)$$

$E_G$  est la production d'énergie brute et  $C_L$  est le coefficient de pertes, donné par :

$$C_L = (1 - \lambda_a)(1 - \lambda_{s\&i})(1 - \lambda_d)(1 - \lambda_m) ; \quad (2.28)$$

$\lambda_a$  est le coefficient de pertes par effet de sillage,  $\lambda_{s\&i}$  est le coefficient de pertes par encrassement des pales ou résultants du verglas,  $\lambda_d$  est le coefficient des pertes pour causes d'arrêts et  $\lambda_m$  est un coefficient représentant les pertes diverses. Les coefficients  $\lambda_a$ ,  $\lambda_{s\&i}$ ,  $\lambda_d$ , et  $\lambda_m$  sont spécifiés par l'utilisateur.

- **Capacité d'absorption et énergie renouvelable fournie :**

Le modèle calcule l'énergie éolienne fournie  $E_D$  par :

$$E_D = E_C \cdot \mu ; \quad (2.29)$$

$E_C$  est l'énergie renouvelable captée (voir la formule 2.27) et  $\mu$  est le taux d'absorption de l'énergie éolienne. Le taux d'absorption de l'énergie éolienne est le pourcentage de l'énergie captée que le réseau isolé ou le système hors réseau peut absorber.

Pour les applications raccordées à une centrale, ce taux est toujours égal à 100% car on estime que le réseau est assez gros pour absorber toute l'énergie produite par le projet de centrale éolienne. Pour les applications en réseau isolé et hors réseau, la valeur du taux d'absorption est entrée par l'utilisateur. Dans les cas des applications en réseau isolé et hors réseau, le modèle calcule un taux d'absorption de l'énergie éolienne suggéré, ou le taux de pénétration éolienne (TPE) est défini par :

$$TPE = \frac{P_{\text{éol}}}{PP} \cdot 100 \quad (2.30)$$

$P_{\text{éol}}$  est la puissance installée et  $PP$  est la charge de pointe, ces deux valeurs étant spécifiées par l'utilisateur.  $P_{\text{éol}}$  est obtenue en multipliant le nombre d'éoliennes par leur capacité (puissance) nominale.

Le taux d'absorption de l'énergie éolienne suggéré varie en fonction de la vitesse du vent et du taux de pénétration éolien. Il est calculé pour la vitesse du vent à la hauteur du moyeu.

- **Excédent disponible d'énergie renouvelable :**

L'excédent disponible d'énergie renouvelable  $E_x$  est simplement la différence entre l'énergie captée  $E_C$  et l'énergie éolienne fournie  $E_D$  :

$$E_x = E_C - E_D \quad (2.31)$$

- **Rendement spécifique :**

Le rendement spécifique  $Y$  est obtenu en divisant l'énergie renouvelable captée  $E_C$  par la surface balayée par l'hélice de l'éolienne :

$$Y = \frac{E_C}{N.A} \quad (2.32)$$

Où  $N$  est le nombre d'éoliennes et  $A$  est la surface balayée par l'hélice d'une éolienne.

- **Facteur d'utilisation de la centrale éolienne :**

Le facteur d'utilisation de la centrale éolienne  $FPI$  est égal à la puissance moyenne produite par l'installation dans une année, divisé par sa puissance nominale. Il est calculé par la formule suivante :

$$FPI = \left[ \frac{E_C}{P_{\text{éol}} \cdot h_y} \right] \cdot 100 \quad (2.33)$$

Où  $E_C$  est l'énergie renouvelable captée exprimée en KWh,  $P_{\text{éol}}$  est la puissance installée de la centrale éolienne exprimée en KW et  $h_y$  est le nombre d'heures dans une année.

Après avoir vu l'aperçu théorique, passons immédiatement à l'aspect pratique c'est-à-dire que nous allons exposer dans cette partie les différentes étapes à suivre pour mieux faciliter notre tâche. Donc, pour cela, nous allons suivre trois étapes simples pour déterminer la faisabilité de l'installation du système éolien, une fois les étapes franchies, nous passerons à la phase suivante. Mais, avant tout, nous allons voir quelles sont les étapes à suivre pour notre cas.

**Étape 1 : Évaluer le site**

2-2- Données climatiques :

2-2-1. Analyse de la distribution du vent à l'UNA :

Avant de considérer le fonctionnement propre de la machine, de faire le choix, il convient de définir la source d'énergie de l'éolienne de l'UNA: le vent. De plus, il y a aussi d'autres paramètres qui ne se séparent pas au vent, c'est-à-dire les paramètres qui constituent les caractéristiques du vent comme :

- L'humidité de l'air ;
- La température ; etc.

Ainsi, le tableau ci-après donne les données climatiques d'Antsiranana de l'année 2009 suivies des courbes correspondantes.

Tableau2. 2.Données climatiques d'Antsiranana, année 2009(Source: NASA Surface meteorology and Solar Energy: RETScreen Data)

		Lieu des données climatiques		Unité
		Latitude	12,3	°N
		Longitude	49,3	°E
		Hauteur de référence	10	m
Mois	Températures moyennes (°C)	Hygrométrie(%)	Vitesse moyenne du vent (m/s)	Direction du vent
Janvier	25,7	64,1	6	S
Février	25,9	67	5,3	S
Mars	26,9	70,3	4,6	SE
Avril	28,4	71,8	4	SE
Mai	29,7	70,3	4,2	SE
Juin	29,3	63,3	8,4	SE
Juillet	28,5	60,7	10,5	SE
Août	28,2	62,2	10	SE
Septembre	28,8	70,3	5,9	SE
Octobre	28,2	71,8	4	SE
Novembre	27,3	65,1	4,8	SE
Décembre	26,4	64,7	5,8	SE
Moyenne annuelle	27,8	66,8	6,1	SE

Remarque :

Ici, la vitesse du vent est obtenue à partir d'une hauteur de référence de 10 m, sous une pression moyenne atmosphérique de 100,1 kPa, la vitesse moyenne du vent annuelle est de 6,1 m/s et sa vitesse maximale est de 10,5 m/s.

Les courbes suivantes illustrent les données climatiques du tableau 2.2 ci-dessus :

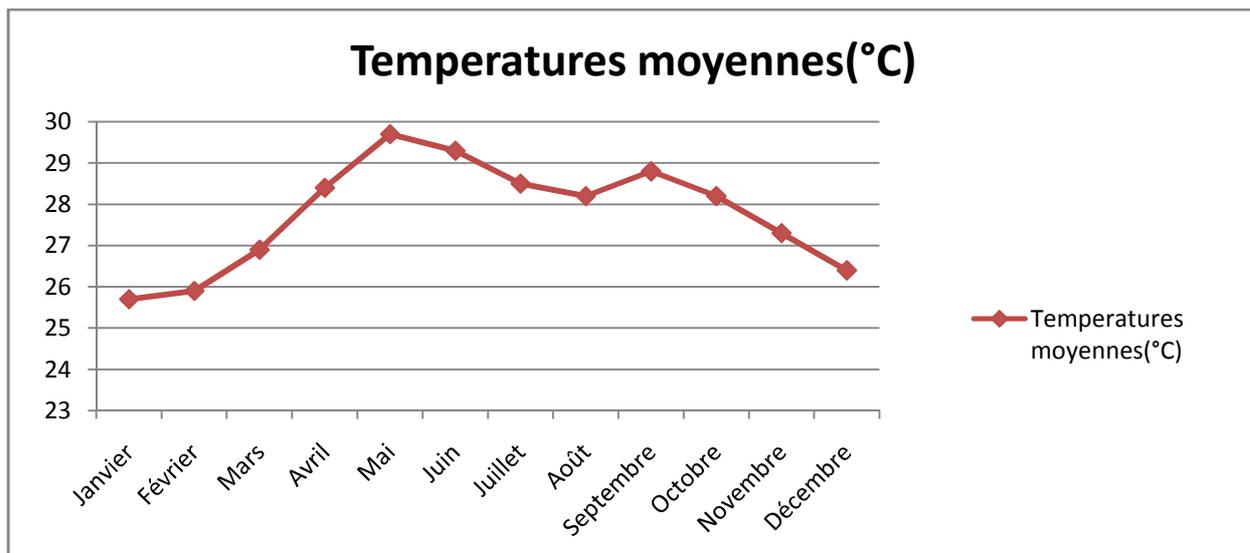


Figure2. 2.Courbe de variation de la température

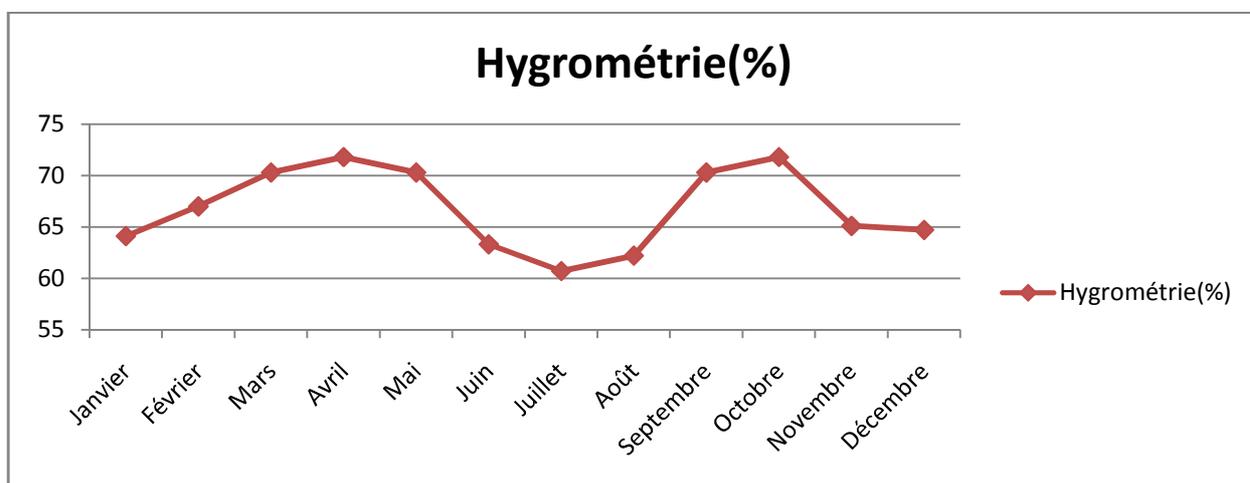


Figure2. 3.Courbe de variation de l'hygrométrie

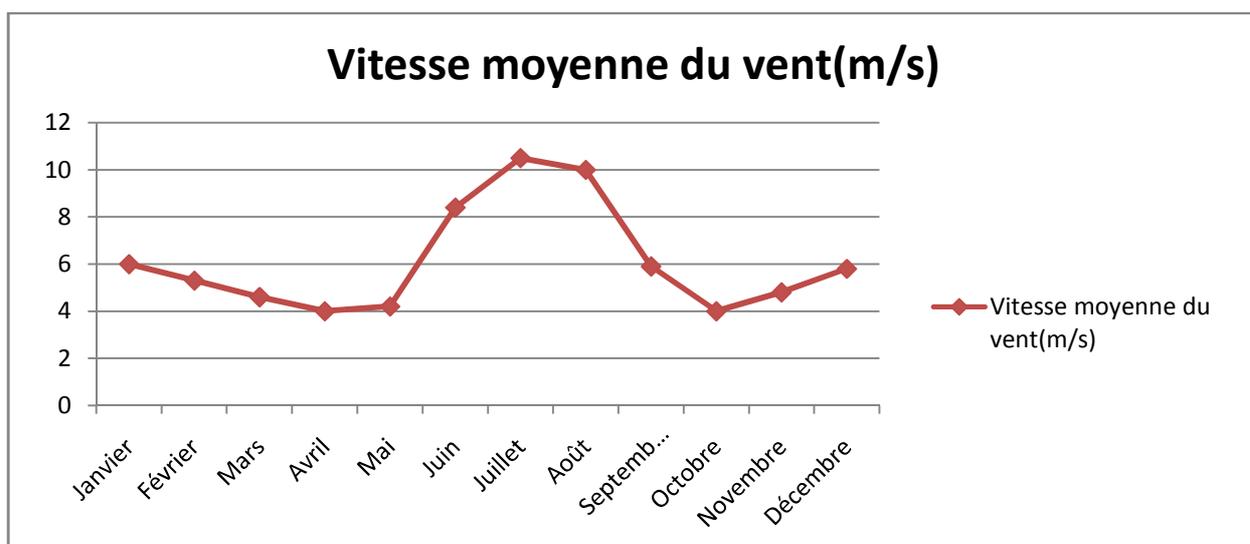


Figure2. 4.Courbe de variation de la vitesse du vent

2-2-2. Variation pluriannuelle de la vitesse du vent :

La vitesse moyenne annuelle du vent diffère d'une année à l'autre. La connaissance de cette dernière garantit la disponibilité du gisement éolien, qui assurera la pérennité du projet d'implantation d'un éolien ou d'un parc éolien. Afin de bien caractériser le potentiel ou le gisement énergétique éolien, il est nécessaire d'étudier le phénomène sur une période de dix (10) années au minimum. Ces données ne sont obtenues qu'auprès de la station météorologique régionale du site.

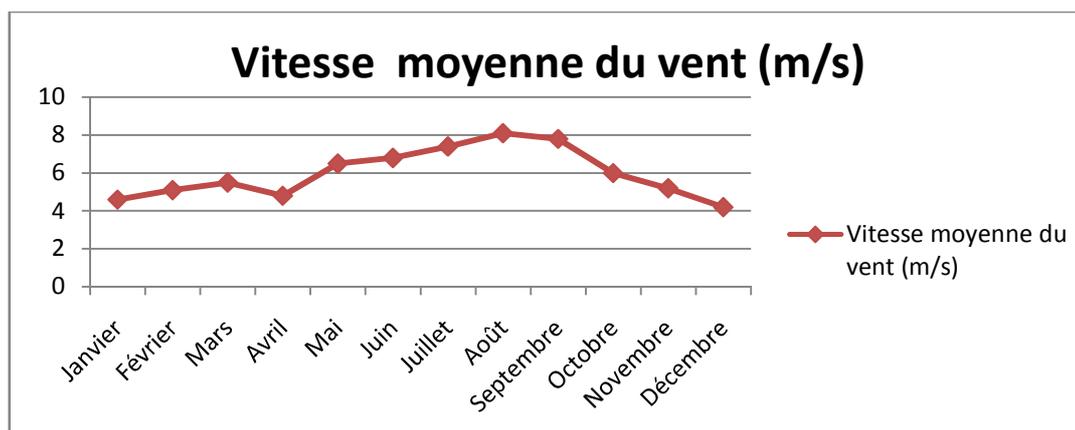


Figure2. 5.Moyenne mensuelle des vitesses du vent sur 10 ans

2-2-3. Évaluation du potentiel éolien :

Avant de faire le choix des aérogénérateurs, il est nécessaire de déterminer la vitesse moyenne annuelle du vent en fonction de la hauteur considérée, puis la densité de probabilité de vent correspondant.

Les données de base ici sont celles obtenues du NASA (Surface meteorology and Solar Energy: RETScreen Data) de l'année 2009 :

- $H_0=10$  [m], Hauteur de référence ;
- $V_m=6,1$ [m/s], vitesse moyenne annuelle du vent à la hauteur  $H_0$ .

Afin qu'on puisse donner la vitesse moyenne du vent à la hauteur voulue, il est nécessaire de déterminer le coefficient de rugosité du sol. La valeur exacte de ce coefficient est un facteur le plus difficile à trouver parce qu'il varie selon l'altitude, ainsi que la vitesse du vent. Ainsi, pour cette étude nous allons le fixer à 0,20.

En appliquant les formules (2.6), (2.8), (2.9), et (2.23), on obtient les résultats dans le tableau suivant :

Tableau2. 3.Vitesse moyenne du vent, facteur d'échelle et facteur de forme en fonction de l'altitude

Hauteur H[m]	10	20	30	40	50	60
Vitesse moyenne annuelle du vent $V_m$ [m/s]	6,1	7	7,6	8,04	8,41	8,73
Facteur d'échelle C	6,89	7,91	8,58	9,09	9,50	9,86
Facteur de forme K	1,6	2,22	2,52	2,82	3,12	3,42



2.3.1- Étude et Analyse de chaque bâtiment :

Voici donc le nombre de Bâtiments et leurs composantes selon leurs états en 2009 :

Désignation	Cité Blocs	Cité PV	Cité PJ	Total
Bâtiment	9	20*	34	63
BE	-	1	4	5
ME	9	15	17**	41
NF	-	4	10	14
Chambres	324	156	128	608
BE	54	-	-	54
ME	270	156	128	554
Toilettes	81	112	64	257
BE	-	-	-	-
ME	41	20	24	85
NF	40	92	40	172
Douches	162	112	64	338
BE	-	-	-	-
ME	79	30	29	138
NF	83	82	35	200
Salles d'étude	27	11	-	38
BE	3	-	-	3
ME	24	7	-	31
NF	-	4	-	4

- \*20 bâtiments dont treize (13) affectés aux étudiants, deux (02) occupés par le PAT, un (01) bâtiments pédagogique et quatre (04) bâtiments condamnés.
- \*\*17 bâtiments dont douze (12) occupés par les étudiants.

Légende :

BE : Bon État

ME : Mauvais État

NF : Non Fonctionnel

PJ : Préfabriqué Jaune

PV : Préfabriqué Vert

Cité	Capacité d'accueil	Nombre d'étudiants logés	Nombre de demande
Blocs	648	715	1700
PV	312	350	
PJ	512	550	
Total	1472	1615	

(Source CROU)

A. Généralité sur les neufs blocs :

Un bâtiment bloc des étudiants comporte deux étages constitués par trente six chambres plus trois salles d'étude, c'est-à-dire trois appartements (le rez-de-chaussée, le premier et le deuxième étage). (Figure 2.7)

La distribution d'énergie pour les bâtiments blocs est effectuée sous canalisation aérienne en triphasé et répartie en monophasé pour chaque bâtiment. Pour la ligne des six blocs, deux bâtiments sont alimentées par une phase, tandis que pour l'autre ligne, une phase pour chaque bloc.

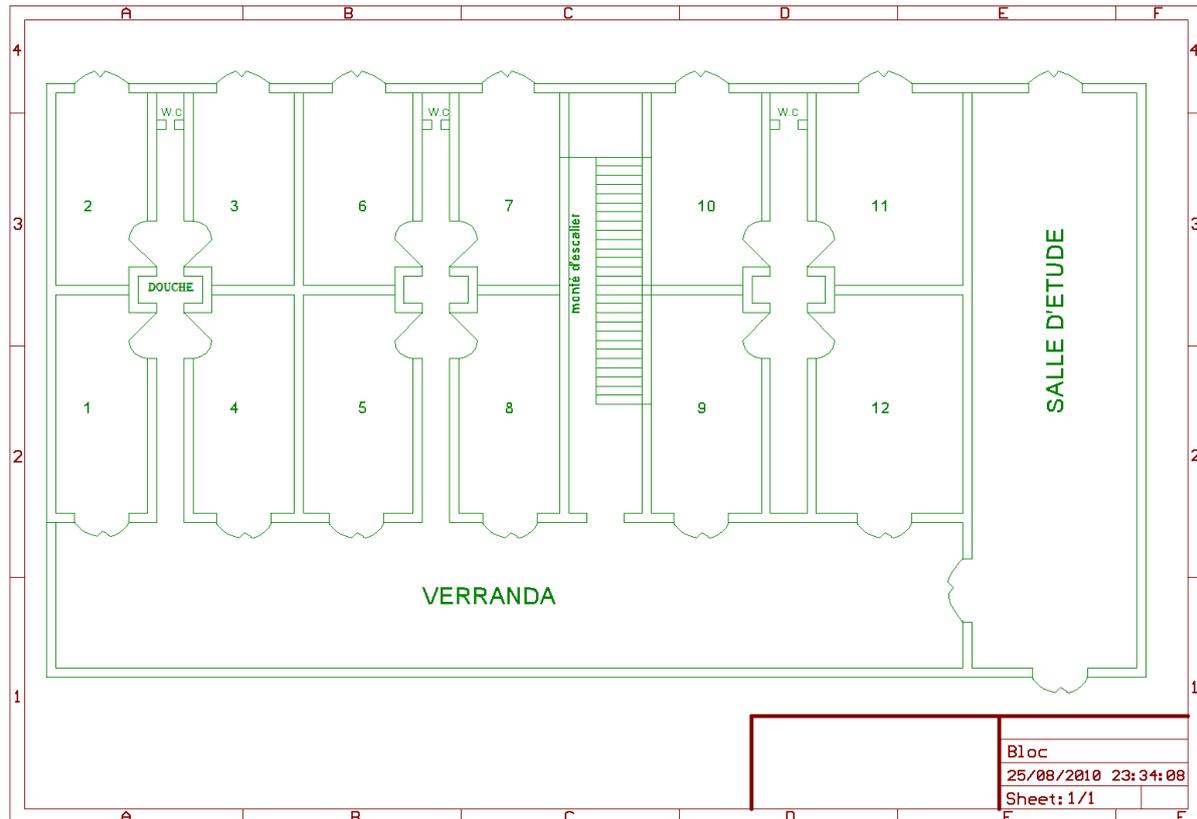


Figure2. 7.Schéma d'un appartement d'un bloc des étudiants

**Les types de charges :**

Les charges varient de façon aléatoire au cours de la journée. Dans la pratique, on utilise un enregistreur pour déterminer ses variations dans le temps. A défaut d'enregistreur, on utilise un procédé statistique pour sa détermination.

- Détermination du courant maximal d'emploi  $I_B$ :

Dans le cas de l'alimentation individuelle d'un appareil, le courant  $I_B$  sera égal au courant assigné  $I_n$  de l'appareil alimenté. Par contre, si la canalisation alimente plusieurs appareils, le courant  $I_B$  sera égal à la somme des courants absorbés, en tenant compte des facteurs d'utilisation, facteurs de simultanéité et facteurs d'extension.

- En courant continu :

$$I_n = \frac{P_n}{U} [A] \quad (2.34)$$

Avec :

$P_n$  : Puissance nominale absorbée [W] ;

$U$  : Tension de service [V] ;

- En courant alternatif :

$$I_n = \frac{S_n}{U} [A] \text{ en monophasé.} \quad (2.35)$$

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3}.U} [A] \text{ en triphasé.} \quad (2.36)$$

Avec :

$S_n$  : Puissance apparente absorbée [VA].

$U$  : tension entre deux conducteurs pour une alimentation monophasée ;  
tension entre phase pour une alimentation triphasée [V].

▪ **Facteur d'utilisation des appareils :  $K_U$**

Dans une installation électrique, on suppose que les récepteurs ne soient jamais utilisés à pleine puissance, on introduit alors un facteur d'utilisation  $K_U$ .

▪ **Facteur de simultanéité :  $K_S$**

Les récepteurs alimentés par une même canalisation, ne fonctionnent pas simultanément dans tous les cas. Pour tenir compte de ce phénomène, qui est lié aux conditions d'exploitation de l'installation, dans le dimensionnement des liaisons, on applique le facteur de simultanéité.

▪ **Facteur d'extension :  $K_e$**

Le rôle du facteur de réserve, également appelé facteur d'extension, est de prévoir une augmentation de la puissance absorbée.

Le courant maximal d'emploi est alors :

$$I_B = I_n \times K_U \times K_S \times K_e [A] \quad (2.37)$$

Avec :

$I_n$  : Courant nominal absorbé par les récepteurs [A] ;

$I_B$  : Courant maximal d'emploi [A].

a) Éclairage domestique :

Pour l'éclairage domestique, les étudiants n'utilisent que la lampe à incandescence de 100W, bien que certains étudiants utilisent des lampes économiques, sachant qu'on a une(01) lampe par chambre, deux(02) lampes pour une salle d'étude, une(01) lampe pour chaque couloir, une(01) lampe pour l'escalier, une(01) lampe pour la douche et une(01) lampe pour la toilette.

Tableau2. 4.Courant d'emploi du circuit d'éclairage d'un bloc

	Nombre	Puissance unitaire [W]	$K_S$	$K_U$	$K_e$	Puissance utile [W]	Courant d'emploi max éclairage $I_B$ [A]
Salle d'étude	3	100	0,63	1	1,2	226,8	1,03
Chambre	36		0,4			1728	7,85
Couloir+ escalier	12					576	2,61
Douche+ toilette	27					1296	5,89
Total pour un bloc.							17,38

b) Les autres équipements électroménagers :

Comme tout autre consommateur on peut trouver tous les appareils électroménagers, comme la télévision, la radio, l'ordinateur, le ventilateur, l'imprimante, le rice-cooker, la résistance, le fer à repasser, etc... dans la plupart des chambres de chaque étudiants, mais ils sont tous branchés via une prise de courant; ainsi pour déterminer une estimation de la puissance utile nous allons faire une estimation de nombre de prise de courant dans chaque chambre, ainsi que dans chaque salle d'étude.

Pour chaque chambre, on a quatre (04) prises de courant de 16 A dont deux (02) pour la cuisine et deux (02) pour toute autre utilisation, tandis que pour chaque salle d'étude on a cinq (05) prises de courant de 16 A dont trois (03) pour la cuisine et deux (02) pour autres utilisations.

Tableau2. 5.Courant d'emploi du circuit de prise de courant d'un bloc

	Nombre	Courant total [A]	$K_S$	$K_U$	$K_e$	Courant d'emploi max (prise de courant) $I_B$ [A]
Salle d'étude	15	240	0,16	1	1,2	46,08
Chambre	144	2304	0,11			304,13
Total pour un bloc.						350,21

Le courant d'emploi pour l'ensemble :

Tableau2. 6.Courant d'emploi corrigé pour un bloc

	$I_B$ max corrigé [A]
Salle d'étude	47,11
Chambre	312,06
Couloir+ escalier	2,61
Douche+ toilette	5,89
Total pour un bloc.	367,67

Pour l'étude, on suppose que les charges soient équilibrées, donc on a les mêmes courants pour les trois phases à l'entrée du bâtiment. Et comme les bâtiments blocs sont couplés en étoile avec le réseau, le courant de ligne est égal au courant de phase, d'où le courant à l'entrée principale d'un bloc est égal à :  $I_{Bmax} = 367,67A$ .

Pour le cas de neuf blocs on a :  $9 \times I_{Bmax} = 3,31 KA$ .

D'où la puissance absorbée par les neufs blocs :

$$S_n = 3310 \times 220 = 728200 VA = 728,2KVA$$

$$\text{Or } P_n = S_n \times \cos\varphi$$

Théoriquement on adopte  $\cos\varphi = 0,8$

$$\text{Donc } P_n = 728,2 \times 0,8 = 582,56 KW.$$

B. Généralité sur les treize bâtiments P.V :

Un bâtiment P.V des étudiants comporte douze (12) chambres avec quatre douches +W.C.

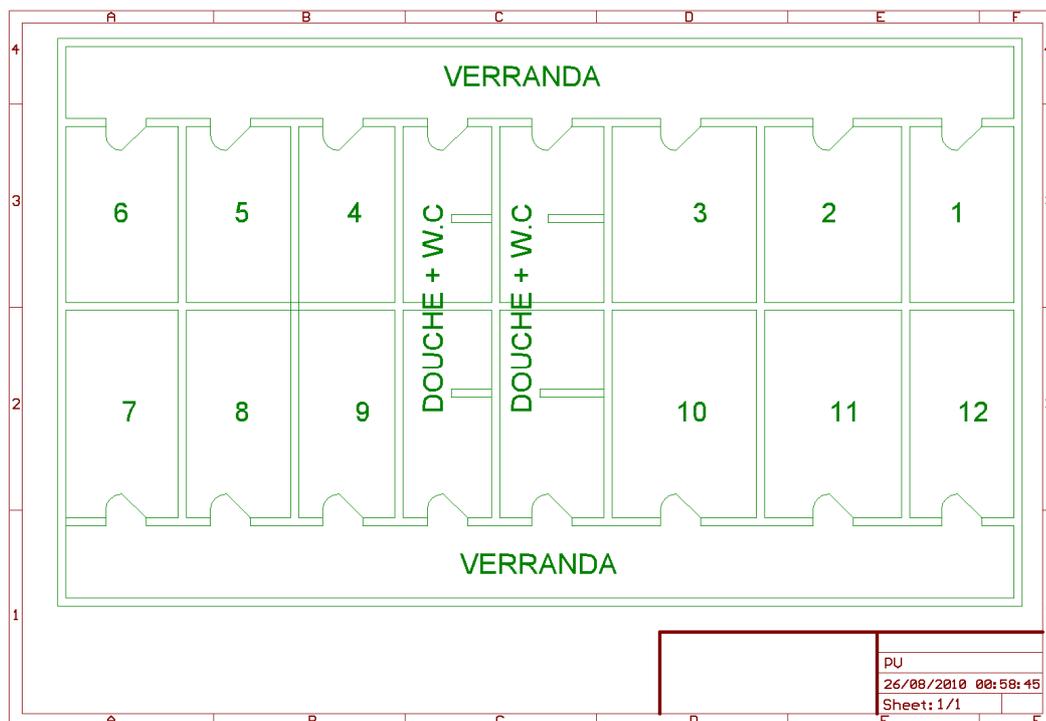


Figure2. 8.Schéma d'un appartement P.V des étudiants

On procédant de la même manière que précédemment, on a :

Pour l'éclairage domestique :

Tableau2. 7.Courant d'emploi du circuit d'éclairage d'un bâtiment P.V

	Nombre	Puissance unitaire [W]	$K_S$	$K_U$	$K_e$	Puissance utile [W]	Courant d'emploi max éclairage $I_B$ [A]
Chambre	12	100	0,42	1	1,2	604,8	2,75
Douche+ toilette	04					201,6	0,92
						Total pour un bâtiment P.V	3,67

Pour les autres équipements électroménagers :

Pour chaque chambre, on a quatre (04) prises de courant de 16 A dont deux (02) pour la cuisine et deux (02) pour toute autre utilisation ;

Tableau2. 8.Courant d'emploi du circuit de prise de courant d'un bâtiment P.V

	Nombre	Courant total [A]	$K_S$	$K_U$	$K_e$	Courant d'emploi max (prise de courant) $I_B$ [A]
Chambre	48	768	0,12	1	1,2	110,6

Le courant d'emploi pour l'ensemble :

Tableau2. 9.Courant d'emploi corrigé d'un bâtiment P.V

	$I_B$ max corrigé [A]
Chambre	113,35
Douche+ toilette	0,92
Total pour un bâtiment P.V	114,27

$$I_{B_{max}} = 114,27A.$$

Pour le cas des treize bâtiments P.V on a :  $13 \times I_{B_{max}} = 1,5 \text{ KA}$ .

D'où la puissance absorbée par les treize bâtiments P.V :

$$S_n = 1500 \times 220 = 330000 \text{ VA} = 330\text{KVA}$$

$$\text{Or } P_n = S_n \times \cos\varphi$$

Théoriquement on adopte  $\cos\varphi = 0,8$

$$\text{Donc } P_n = 330 \times 0,8 = 264 \text{ KW}.$$

C. Généralité sur les dix sept(17) bâtiments P.J :

Un bâtiment P.J des étudiants comporte huit (08) chambres avec quatre (04) douches +W.C.

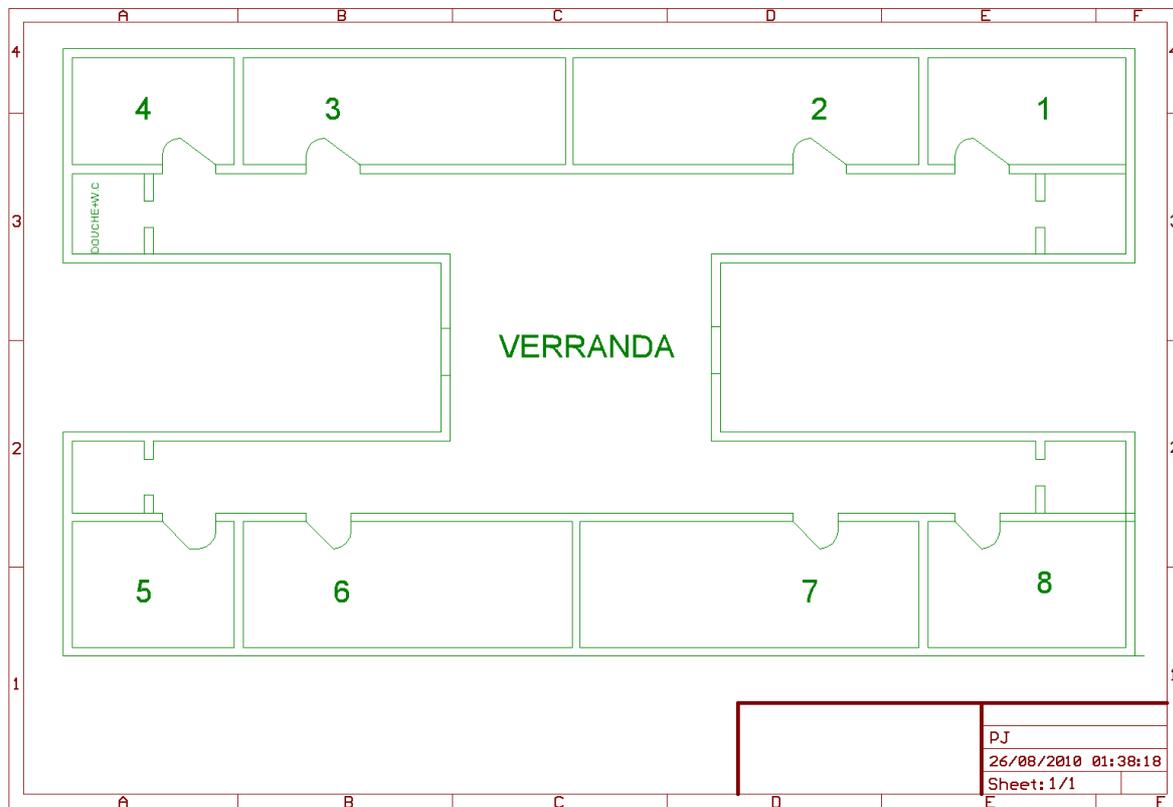


Figure2. 9. Schéma d'un appartement P.J des étudiants

On procédant de la même manière que précédemment, on a :

Pour l'éclairage domestique :

Tableau2. 10.Courant d'emploi du circuit d'éclairage d'un bâtiment P.J

	Nombre	Puissance unitaire [W]	$K_S$	$K_U$	$K_e$	Puissance utile [W]	Courant d'emploi max éclairage $I_B$ [A]
Chambre	08	100	0,49	1	1,2	470,4	2,14
Douche+toilette	04					235,2	1,07
						Total pour un bâtiment P.J	3,21

Pour les autres équipements électroménagers :

Pour chaque chambre, on a quatre (04) prises de courant de 16 A pour dont deux (02) pour la cuisine et deux (02) pour toute autre utilisation ;

Tableau2. 11.Courant d'emploi du circuit de prise de courant d'un bâtiment P.J

	Nombre	Courant total [A]	$K_S$	$K_U$	$K_e$	Courant d'emploi max (prise de courant) $I_B$ [A]
Chambre	32	512	0,13	1	1,2	79,87

Le courant d'emploi pour l'ensemble :

Tableau2. 12.Courant d'emploi corrigé d'un bâtiment P.J

	$I_B$ max corrigé [A]
Chambre	82,01
Douche+ toilette	1,07
Total pour un bâtiment P.J	83,08

$$I_{B_{\max}} = 83,08A.$$

Pour le cas des dix sept bâtiments P.J on a :  $17 \times I_{B_{\max}} = 1,41$  KA.

D'où la puissance absorbée par les dix sept bâtiments P.J :

$$S_n = 1412 \times 220 = 310640VA = 311KVA$$

$$\text{Or } P_n = S_n \times \cos\varphi$$

Théoriquement on adopte  $\cos\varphi = 0,8$

$$\text{Donc } P_n = 311 \times 0,8 = 248,8 \text{ KW.}$$

D. Généralité sur le bâtiment R+3(belle rose) :

Le bâtiment R+3 (belle rose) des étudiants comporte trois étages constitués par soixante seize (76) chambres dont seize (16) chambres au rez-de-chaussée plus vingt (20) chambres pour chaque étage. En plus, on a une salle d'accueil, un bureau, une salle de loisir, quatre (04) salles d'étude, quatre (04) salles de cuisine, quatre (04) buanderies (laveries), douze (12) toilettes+douches, et pour chaque étage on a un véranda.

La particularité de ce bâtiment c'est que toutes les lampes sont des lampes à néon économiques de 20 W, en plus la présence de système de protection (disjoncteur différentiel) dans chaque niveau (étage), et la mise en place de cuisine collective évite la forte consommation en énergie électrique de ce bâtiment. Ainsi cette typique d'installation doit servir un guide pour rétablir les autres installations dans les blocs, PV, et PJ mais aussi d'éviter le gaspillage d'énergie.

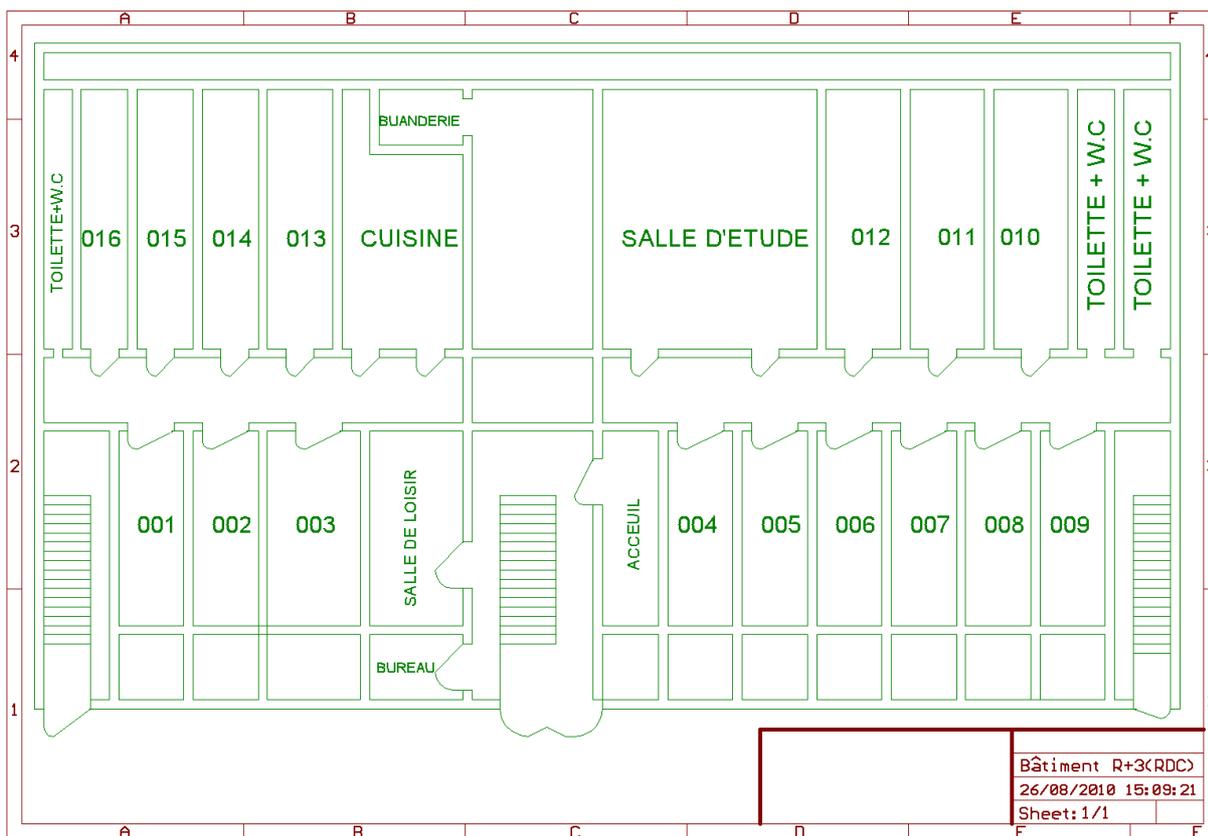


Figure2. 10.Schéma d'un appartement R+3(belle rose) des étudiants (rez-de-chaussée)

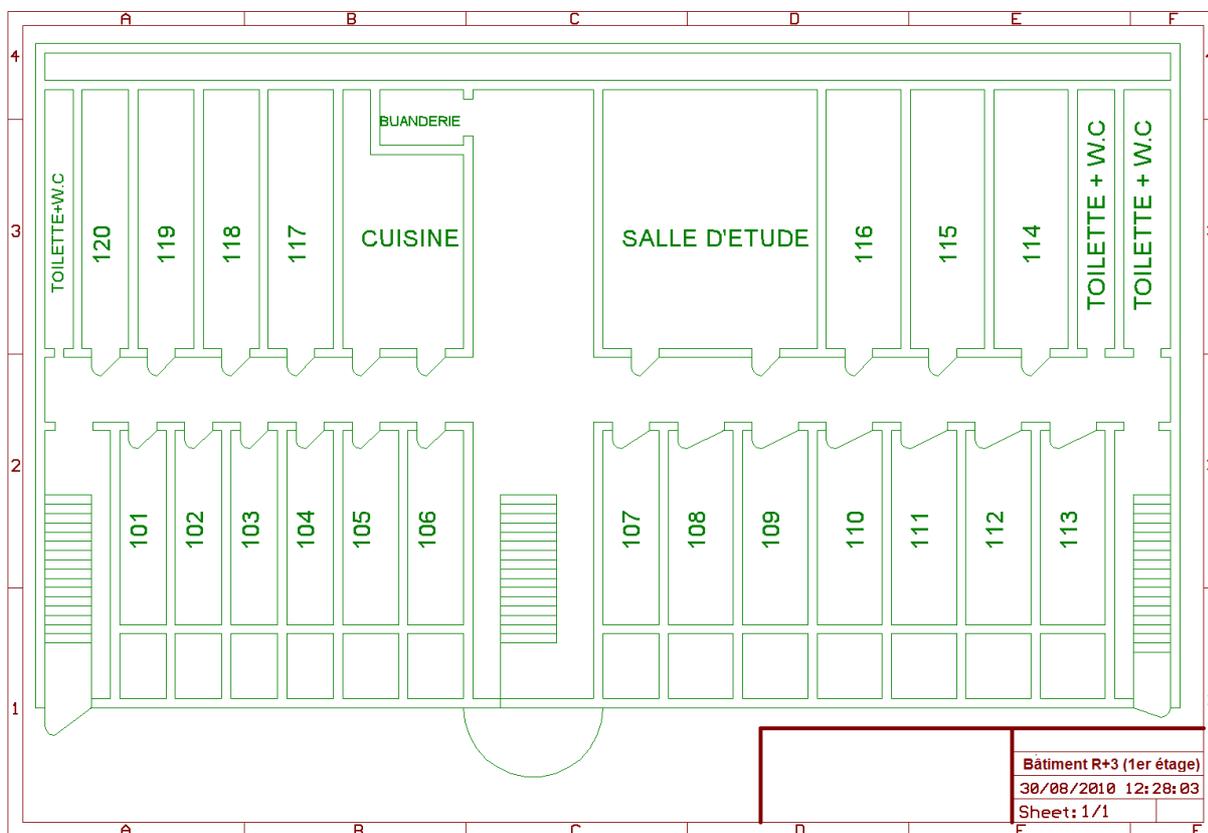


Figure2. 11.Schéma d'un appartement R+3(belle rose) des étudiants (1er étage et plus)

En procédant de la même manière que précédemment, on a :

Pour l'éclairage domestique :

Tableau2. 13.Courant d'emploi du circuit d'éclairage du bâtiment R+3(belle rose)

	Nombre Unitaire	Nombre totale	Puissance unitaire [W]	$K_S$	$K_U$	$K_e$	Puissance utile [W]	Courant d'emploi max éclairage $I_B$ [A]
Accueil	03	03	20	1	1	1,2	72	0,33
Bureau	01	01		1			24	0,11
Salle d'étude	09	36		0,4			345,6	1,61
Salle de loisir	07	07					67,2	0,31
Chambre	02	152					1459,2	6,63
Buanderie	01	04					38,4	0,17
Cuisine	05	20					192	0,9
Douche+toilette	03	12					115,2	0,52
Couloir+ escalier	16	64					614,4	2,8
Total								13,38

Pour les autres équipements électroménagers :

Pour chaque chambre, on a deux (02) prises de courant de 16 A, dans chaque cuisine on trouve sept (07) prises, deux (02) prises dans la buanderie, deux (02) prises dans le bureau, deux (02) prises dans la salle de loisir, quatre (04) prises dans l'accueil, et sept (07) prises dans la salle d'étude.

Tableau2. 14.Courant d'emploi du circuit de prise de courant du bâtiment R+3(belle rose)

	Nombre	Courant total [A]	$K_S$	$K_U$	$K_e$	Courant d'emploi max (prise de courant) $I_B$ [A]
accueil	04	64	0,114	1	1,2	8,76
Bureau	02	32	0,128			4,92
Salle de loisir	02	32	0,128			4,92
Salle d'étude	28	448	0,102			54,84
Chambre	152	2432	0,1			291,84
Cuisine	28	448	0,102			54,84
Buanderie	8	128	0,107			16,44
Total						436,56

Le courant d'emploi pour l'ensemble du bâtiment R+3(belle rose) :

Tableau2. 15.Courant d'emploi corrigé du bâtiment R+3(belle rose)

	$I_B$ max corrigé [A]
accueil	9,09
Bureau	5,03
Couloir+ escalier	2,8
Salle de loisir	5,23
Salle d'étude	56,45
Chambre	298,47
Cuisine	55,74
Buanderie	16,61
Douche+ toilette	0,52
Total pour un bloc	449,94

$$I_{Bmax} = 449,94 \text{ A.}$$

D'où la puissance absorbée par le bâtiment R+3(belle rose).

$$S_n = 449,94 \times 220 = 98986,8 \text{ VA} = 98,98 \text{ KVA}$$

$$\text{Or } P_n = S_n \times \cos\varphi$$

Théoriquement on adopte  $\cos\varphi = 0,8$

$$\text{Donc } P_n = 98,98 \times 0,8 = 79,18 \text{ KW.}$$

En tenant compte des deux transformateurs sur poteaux du laboratoire électronique et du laboratoire électrotechnique ayant chacun une puissance apparente de 50kVA et 80 kVA, c'est-à-dire une puissance nominale absorbée de 40 KW et 64 KW.

On a la puissance nominale totale de l'UNA égale à :

$$P_{nT} = 582,56 + 264 + 248,8 + 79,18 + 40 + 64 = 1278,54 \text{ KW}$$

$P_{nT} = 1,3 \text{ MW}$
---------------------------

### **Étape 3 : Description technique des aérogénérateurs adaptés :**

#### 2-4- Fabricants de turbines éoliennes

Actuellement, il existe différents types d'aérogénérateurs comme : NORDEX, VESTAS, ENERCON, NEG MICON, GE WIND, ENRON, BONUS, VERGNET Medium Power (GEV MP), etc. Mais le marché mondial de la fabrication d'éoliennes est dominé par une poignée de grands fabricants, dont les 10 leaders détiennent 95 % du marché pour la production et l'installation (voir Figure 2.12).

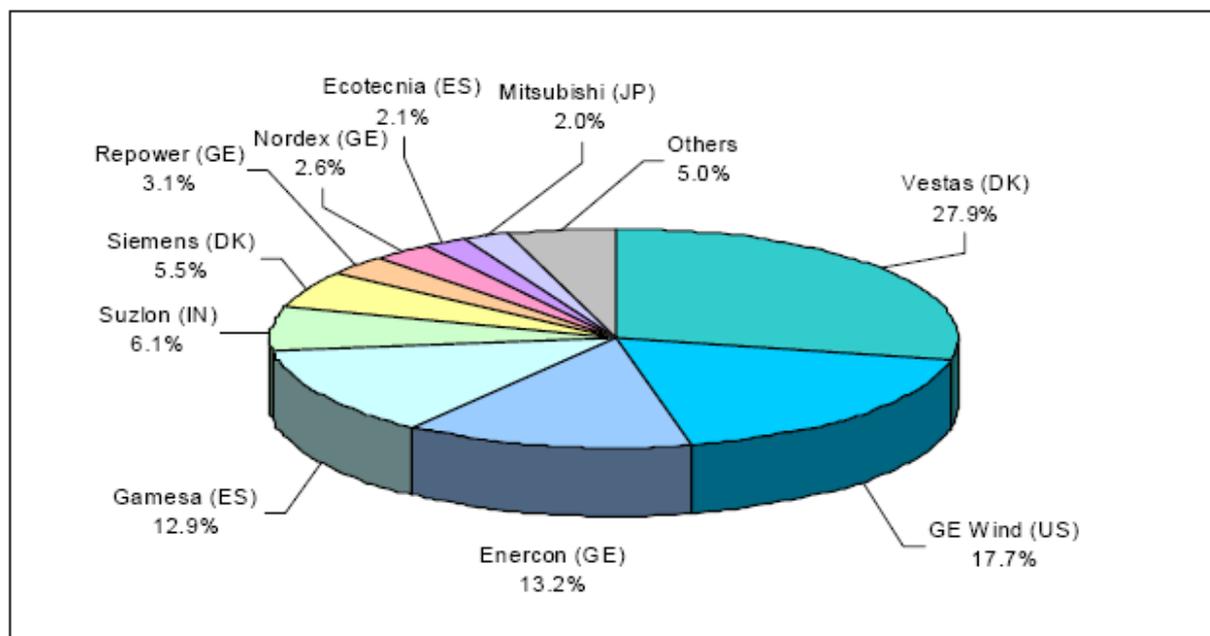


Figure2. 12.répartition mondiale des parts de marché par fabricant de turbines éoliennes (production et installation)

Mais encore dans ce travail de mémoire, nous allons étudier la marque VERGNET Medium Power (GEV MP) car il est parmi les fabricants d'éoliennes anticycloniques de moyenne puissance. Beaucoup de régions exposées aux cyclones comme Madagascar bénéficient d'un gisement éolien fort et régulier, et donc d'une source d'énergie très intéressante. Mais les éoliennes y sont exposées à des vents pouvant atteindre 250km/h... Les éoliennes GEV MP 275 kW et GEV HP 1 MW permettent de tirer profit du potentiel éolien des zones cycloniques, en garantissant la sécurité des hommes et du matériel, grâce à un système unique d'abaissement, qui permet de les sécuriser au sol très rapidement en cas d'alerte cyclonique. Elles peuvent ainsi résister à des vents de plus de 300km/h.

Pour le choix d'aérogénérateur adapté dans notre site nous avons choisies le GEV MP 275 kW, pourquoi ? Simplement parce que la marque est déjà présent à Madagascar donc facile à l'accès, mais aussi un type de GEV 20 kW a été déjà installé à l'UNA.

Voici donc quelques avantages et les quelques raisons qui nous ont conduit à faire ce choix:

2-4-1. Les avantages du GEV MP 275 kW:

a) Structure légère :

Avec un poids de 20 tonnes pour une hauteur de 55 mètres, la GEV MP affiche un rapport performance/poids inégalé : elle est 2 fois plus légère au kW qu'une éolienne conventionnelle.

b) Nacelle compacte :

2 nacelles tiennent dans un seul container standard de 20''.

c) Mât haubané léger :

Constitué d'éléments modulaires de 11,88 mètres de long, il se transporte en containers de 40''.

d) Installation autonome :

L'ensemble de l'éolienne est assemblé au sol, puis érigé grâce à un treuil hydraulique intégré. Aucune grue n'est requise. Seul un chariot télescopique est nécessaire à l'assemblage.

e) Fondations réduites :

L'utilisation de haubans permet de diminuer drastiquement les fondations : à peine 15 m<sup>3</sup> de béton, soit 80% de béton en moins comparé à une éolienne conventionnelle.

f) Rotor bipale - Système d'abaissement exclusif :

Le design bipale de la GEV MP lui permet d'être abaissée, ce qui permet d'effectuer la maintenance, l'entretien périodique et le nettoyage des pales au niveau du sol. La manœuvre d'abaissement s'effectue en toute sécurité en moins d'une heure, par deux personnes, grâce au treuil intégré.

g) Protection anticyclonique :

En cas d'alerte cyclonique, la rapidité de la manœuvre d'abaissement permet de sécuriser tout parc éolien en un temps record. Une fois bloquée au sol, la GEV MP peut supporter des vents de plus de 300 km/h (cyclone catégorie 5).

h) Protection antisismique :

En cas de secousse sismique, la structure légère et haubanée de la GEV MP offre une grande résistance mécanique.

i) Pales haute résistance :

Le profil optimisé des pales leur confère un excellent rapport rendement/poids. La fabrication des pales, totalement intégrée, se fait selon les meilleures méthodes actuelles : infusion sous vide, finition par enduit, renforcement du bord d'attaque, bandes anti-abrasion...

j) Traitement anticorrosion :

Le mât ainsi que toutes les parties exposées sont protégées par un revêtement spécifique. Il garantit une protection efficace de la machine pendant toute sa durée de vie, y compris en atmosphères humides, salines, ou fortement corrosives.

k) Génératrice tout-terrain :

La GEV MP est équipée d'une robuste génératrice à cage d'écureuil, produite par un industriel de premier plan. Elle est conçue pour fonctionner dans les conditions les plus rigoureuses :

- De -20°C à +50°C ;
- 100% d'humidité relative ;
- Atmosphère marine (moins de 100 m du rivage) ;
- Étanchéité IP55 ;
- Traitement spécifique du rotor et du stator contre la corrosion en zone tropicale (vis, capot de ventilateur et graisseurs inox).

l) Capteurs et automates protégés :

- Vernis protégeant les composants électroniques de la condensation ;
- Connecteurs à haut niveau d'étanchéité (IP 67) ;
- Protection électromagnétique.

m) Moyeu oscillant :

Avec son articulation élastique lamifiée (caoutchouc/acier), cette technologie permet de réduire de 35% les contraintes subies par l'éolienne, et donc son poids. Elle réduit d'autant les coûts de maintenance associés, et assure une plus longue durée de vie.

n) Maximiser la production en zones cycloniques

Grâce à son système d'abaissement unique, la GEV MP peut être installée sur des sites où seules des machines de classe 1 renforcées pourraient fonctionner. Avec un rotor de 32 mètres de diamètre situé à 55 mètres de hauteur, la surface balayée de 804 m<sup>2</sup> exploite au mieux le gisement éolien.

o) Amortisseur de couple :

Un amortisseur mécanique absorbe les fluctuations de couple. Ce système permet de limiter les efforts subis par la chaîne cinématique, et de lisser au maximum le signal électrique généré.

p) Régulation par calage variable de pale (pitch) :

La régulation à pas variable permet d'opérer un couplage direct au réseau, de réguler précisément la puissance fournie et d'éliminer tout risque de survitesse.

q) Systèmes de sécurité

L'ensemble des systèmes de sécurité satisfait aux normes internationales :

- Freinage par mise en drapeau, relayé par des unités de secours indépendantes en cas de coupure réseau ;
- Verrouillage du rotor permettant d'assurer les opérations de maintenance en toute sécurité ;
- Protection contre la foudre.

r) PLC industriel :

Le PLC (Contrôleur Logique Programmable) est situé dans le local électrique en pied de mât.

Il gère en temps réel tous les paramètres nécessaires :

- Mesures du vent (direction et vitesse) ;
- Paramètres machine (vitesse de rotation du rotor, pas des pales, orientation de la couronne, courant en sortie de génératrice...)
- Transformateur élévateur ;
- Contrôle du Cos Phi.

s) V-SCADA™ :

Utilisable sur site ou par accès distant, notre système contrôle la production en temps réel permet d'acquiescer les défauts à distance, ou depuis le poste de contrôle central Vergnet inutile d'envoyer un technicien. Il Enregistre toutes les données et les synthétise sous la forme de rapports conviviaux adapté aux systèmes de transmission analogiques (ligne téléphonique standard) ou numériques et sécurisé en cas de coupure réseau par une batterie.

2-5- Évaluation de production énergétique :

La moyenne annuelle de la pression atmosphérique d'Antsiranana dans l'année 2009 est de 100.1kPa, la moyenne annuelle de température est de 27,8°C et la densité du vent est de 1,22Kg/m3.

Pour le GEV MP 275 KW :

- Puissance éolienne installée  $P = 275 \text{ KW}$  ;
- La hauteur du moyeu est à  $H = 60 \text{ m}$  ;
- la surface balayée par les pales est  $A = \pi R^2 = 3,14 * 16^2 = 804 \text{ m}^2$  ;
- Le coefficient de puissance aérodynamique est  $C_p = 0,45$  ;
- Le facteur de forme à cette hauteur est  $K = 3,42$  ;
- Le facteur d'échelle à cette hauteur est  $C = 9,86$  ;

Voici donc le tableau correspondant à la production énergétique à la hauteur de 60 m sur le site de l'UNA :

Tableau2. 16.Résultats de calculs à la hauteur de 60 m sur le site de l'UNA

Vitesse du vent (m/s)	Distribution de probabilité de Weibull $(p(V_x) = 1 - \exp[-(\frac{V_x}{c})^k])$	Densité de probabilité de Weibull $(f(V_x) = k \frac{V_x^{k-1}}{c^k} \exp(-(\frac{V_x}{c})^k)$	Puissance (en KW)	Énergie aérolaïque disponible (KWh/an) $E_{an} = 8760 \sum_0^{V_x} f(V_x)P(V_x)$
1	0,00040	0,00136	0	0
2	0,00426	0,00727	0	0
3	0,01694	0,01915	0	0
4	0,04468	0,03733	4,2	1.373,44536
5	0,09339	0,06079	19,6	10.437,39984
6	0,16715	0,08682	38,4	29.204,85888
7	0,26645	0,11105	63,5	61.772,673
8	0,38689	0,12822	101,3	113.780,8894
9	0,51900	0,13337	145,3	169.757,0704
10	0,64985	0,12566	193,9	213.441,5522
11	0,76631	0,10562	233,9	216.411,5777
12	0,85881	0,07877	256,8	177.198,4714
13	0,92377	0,05161	270,1	122.113,1824
14	0,96372	0,02938	273,5	70.390,3668
15	0,98499	0,01436	275	34.593,24
16	0,99468	0,00595	275	14.333,55
17	0,99840	0,00206	275	4.962,54
18	0,99960	0,00058	275	1.397,22
19	0,99991	0,00013	275	313,17
20	0,99998	0,00002	275	48,18
21	0,99999	0,00000	0	0
22	0,99999	0,00000	0	0
23	0,99999	0,00000	0	0
24	0,99999	0,00000	0	0
25	0,99999	0,00000	0	0

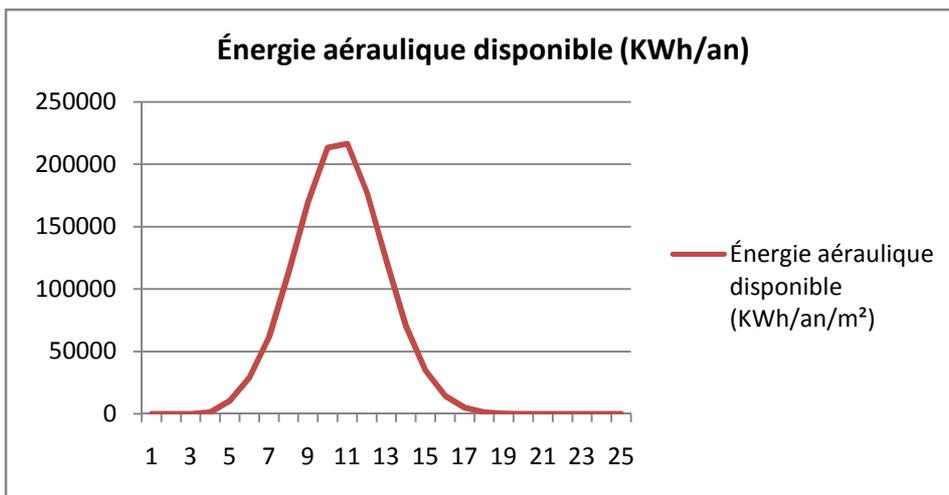


Figure2. 13. Courbe d'énergie fournie par l'aérogénérateur

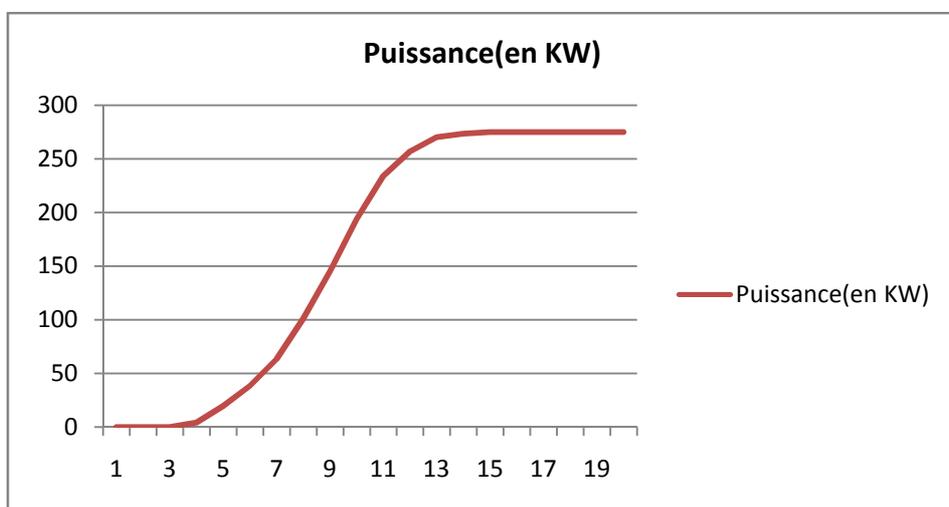


Figure2. 14. Courbe de puissance de l'aérogénérateur

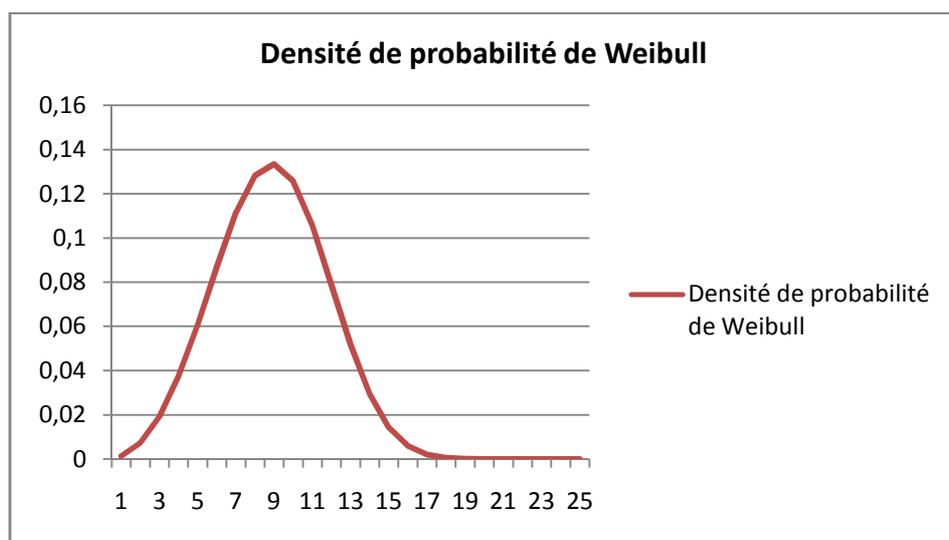


Figure2. 15. Courbe de densité de probabilité de Weibull

2-6- Calcul pour le dimensionnement des éoliennes :

Pour produire les 1,3 MW, nous avons besoins de cinq (05) aérogénérateurs de type GEV MP 275 kW, c'est-à-dire une puissance installée total de 1,375 MW. On est donc en présence d'un parc éolien composé de 05 GEV MP 275 kW.

2-7- Détermination des autres composants du système (ACS) :

Comme nous parlons d'une centrale éolienne autonome, la nécessité des ACS est importante pour le fonctionnement de la centrale.

Les ACS les plus importants sont les batteries, l'onduleur et le chargeur de batterie. Les ACS restants sont les câbles, les interrupteurs, les régulateurs de charges, les disjoncteurs, les équipements de surveillance, les compteurs et les autres appareils qui ne sont pas nécessairement fournis par le fabricant. Nous devons avoir facilement accès aux ACS pour procéder à l'entretien des batteries et aux réparations qui s'imposent, et pour recueillir les données telles que le nombre de kilowattheures produits. Et prévoir un endroit spécial dans un atelier, un abri ou à l'intérieur de la maison pour installer les ACS.

Voici donc le schéma du système de production au complet :

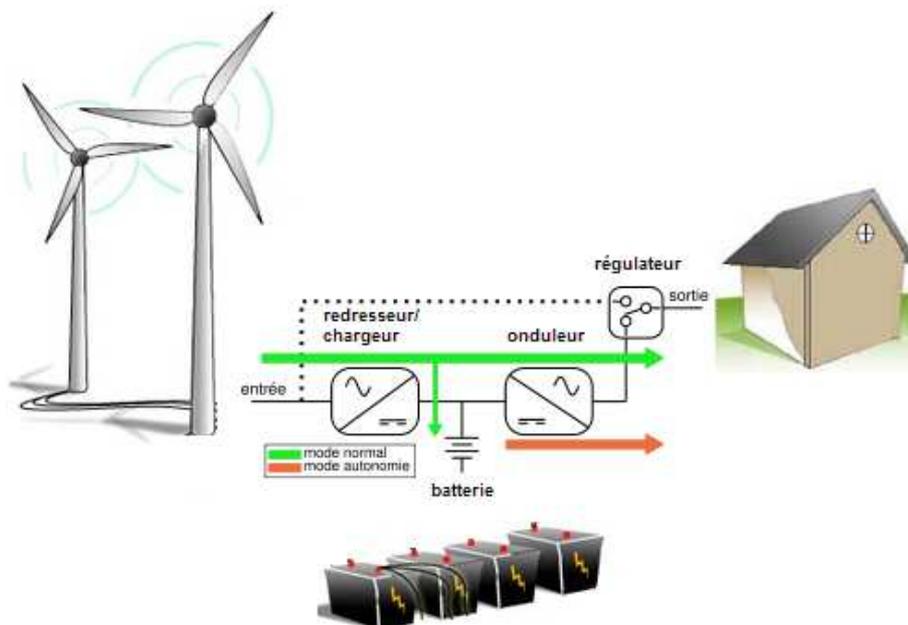


Figure2. 16.Système de production au complet

2-7-1- Calcul pour le dimensionnement des convertisseurs chargeurs:

Pour convertir la sortie de courant alternatif provenant de l'éolienne GEV MP 275 en courant continu standard, on utilise des convertisseurs chargeurs à la fois pour convertir le courant alternatif en continu mais aussi pour charger les batteries.

Pour que la puissance du convertisseur / redresseur atteigne 1,375 MW et la tension de sortie 12V pour chaque convertisseur, nous utiliserons 550 convertisseurs chargeurs de 2500W de marque Multiplus VICTRON.

2-7-2- Calcul pour le dimensionnement des batteries :

Le but est de calculer la capacité des batteries à absorber les fluctuations de la production d'énergie. Si nous avons une tension de sortie de 12 V provenant du convertisseur chargeur, en connaissant la consommation journalière totale de l'UNA, c'est-à-dire  $D = 1,3$  MWh/j,  $L$  étant la limite de décharge profonde de la batterie, on le considère généralement entre 60 à 80%,  $A$  étant l'autonomie souhaiter exprimé en jour (elle vaut généralement de quelques jours à deux (02) semaines), elle correspond au nombre de jours, pendant lesquels la demande doit être couverte sans apport de l'énergie éolienne, ainsi la capacité de la batterie est déterminée par la relation :

$$C = \frac{A.D}{L.U} \quad (2.38)$$

Si on fixe l'autonomie  $A$  en 5 jours et  $L$  à 80%, on a :

$$C = \frac{5 \cdot 1,375 \cdot 10^6}{0,8 \cdot 12} = 716.145,833 \text{ Ah}$$

On choisira des batteries dont la capacité est proche de 716.145,833Ah c'est-à-dire pour une batterie à gel de marque VICTRON 220Ah/12V, on a donc 3255 batteries.

2-7-3- Calcul pour le dimensionnement des onduleurs :

Pour convertir la sortie de courant continu des batteries en courant alternatif standard, semblable à ceux que fournissent les services publics d'électricité, on utilise les onduleurs.

Ainsi, pour transformer la tension continue 12V en tension alternatif 230V de fréquence 50Hz, il faut brancher directement l'onduleur sur la batterie.

Pour que la puissance de l'onduleur atteigne 1,375 MW et la tension de sortie 230V pour chaque convertisseur, nous utiliserons 550 onduleurs de 2500W de marque Eco.

2-8- Bilan des matériels et équipements :

Tableau2. 17. Bilan des matériels et équipements nécessaires à l'installation

Désignation	Puissance unitaire(ou capacité unitaire)	Nombres totales	Puissance totales (ou capacité totale)
Éolienne GEV MP 275	275 KW	05	1,375 MW
Convertisseurs chargeurs Multiplus VICTRON	2,5 KW	550	1,375 MW
Batterie à gel VICTRON 220Ah/12V	220Ah	3255	716.145,833Ah
Onduleurs 2500W Eco	2,5 KW	550	1,375 MW

## CHAPITRE III – ÉVALUATION DU COUT D'INSTALLATION

### 3-1- Généralité :

Cette étude consiste à évaluer le coût total du projet pour qu'on puisse avoir de l'investissement. Mais aussi, il nous permet de déterminer le coût d'investissement total formé par l'ensemble du :

- Coût de la machine et de ses accessoires ( $C_{PM}$ ) ;
- Coût d'étude de faisabilité ( $C_{EF}$ ) ;
- Coût d'installation ( $C_I$ ).

Il est intéressant de savoir que les calculs des différents coûts son basés sur les coûts de la machine et de ses accessoires ( $C_{PM}$ ).

Un projet éolien représente un investissement. Le schéma ci-dessous présente la décomposition de cette dépense :

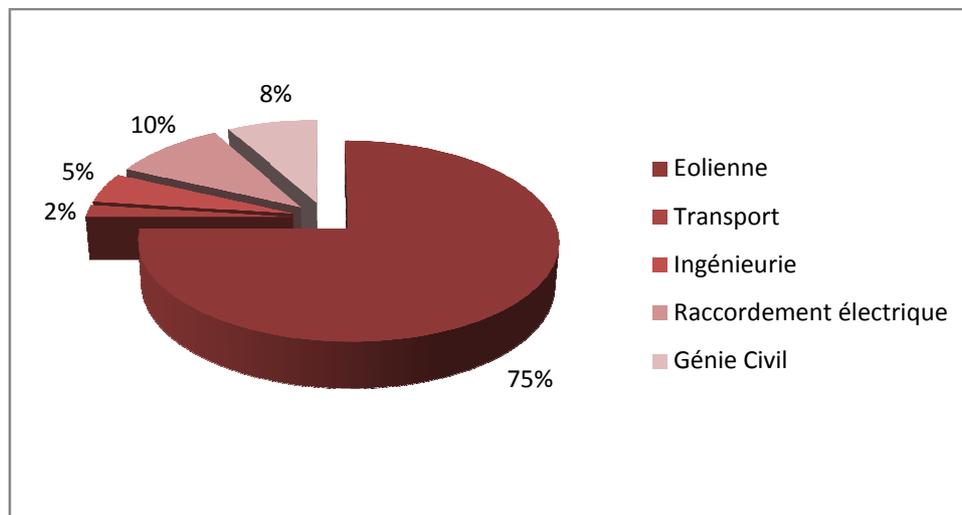


Figure3. 1.Répartition des coûts d'un projet éolien

### 3-2- Coût de la machine et de ses accessoires ( $C_{PM}$ ) :

Ce coût est variable suivant la performance de la machine et sa puissance. Mais en général, ce coût peut aller de 1000[€] jusqu'à 1800[€] par KW en sortant de l'usine. Le prix moyen d'un grand parc éolien moderne se situe autour de 1.000[€] par kilowatt (kW) de puissance installée.

3-3- Coût d'étude de faisabilité (CEF) :

Ce coût est l'ensemble des dépenses en étude :

- Météorologique ;
- Géologique du site ;
- D'impact sur l'environnement ;
- Concernant la mise en connexion au réseau.

Ce coût n'est pas fixe, il varie selon la complication d'étude et la taille de la centrale à étudier. Il est donné par la formule suivante :

$$C_{EF} = (2.5 \text{ à } 5\%) \text{ de } C_{PM}$$

3-4- Coût d'installation (CI) ou Coût de construction (CC) :

Les coûts d'installation comprennent les fondations (en béton armé, le plus souvent), la construction de voies (nécessaires pour transporter la génératrice et les sections de la tour au site), le transformateur (nécessaire pour convertir le courant à basse tension produit par l'éolienne en courant à haute tension correspondant à celui du réseau électrique local), la liaison téléphonique permettant de contrôler et surveiller l'éolienne à distance, ainsi que les coûts du câblage (pose du câble reliant l'éolienne au réseau électrique).

Il est évident que les coûts de la construction de voies et de fondations dépendent de la constitution du sol (dictant entre autres les mesures nécessaires à prendre pour construire un chemin capable de supporter un camion de 30 tonnes). D'autres facteurs variables sont la distance à la route ordinaire la plus proche, les coûts de transport au site d'une grue mobile, et la distance à une ligne à haute tension capable de manier la production maximale d'énergie de l'éolienne.

Ainsi, on détermine dans ce coût les éléments suivants :

- Dépenses en travaux de génie civil ;
- Dépenses en travaux de manutention ;
- Dépenses aux accessoires (câbles, poteaux, transformateurs, etc.) ;
- Dépense au dédouanement;

Ce coût est très important et il occupe une grande partie du coût d'investissement. Il est donné par la relation suivante :

$$C_I = (50 \text{ à } 70\%) \text{ de } C_{PM}$$

3-5- Coût d'investissement total (CIT) :

C'est la somme de tous les coûts précédents :

$$C_{IT} = C_{PM} + C_{EF} + C_I$$

Le tableau suivant nous montre les différents coûts dits précédemment appliqués dans notre cas :

Tableau3. 1.Coût et prix de revient pour chaque investissement

	Éolienne GEV MP 275
Nombres nécessaires	05
Puissances installée [KW]	1.375
Coût de la machine et de ses accessoires(CPM) (1000€/KW)	1.375.000 € (3.437.500.000Ar)
Coût d'étude de faisabilité (CEF) (2.5% de C <sub>PM</sub> )	34.375 € (85.937.500 Ar)
Coût d'installation (CI) ( 50%de C <sub>PM</sub> )	687.500 € (1.718.750.000 Ar)
Coût d'investissement total pour l'éolien (CIT)	2.096.875 € (5.242.187.500 Ar)

3-6- Calcul des prix totaux de l'installation :

Tableau3. 2.Coût et prix totaux de l'installation

	Désignation	Nombres nécessaires	Prix Unitaire (en €)	Prix totaux (en €)	Prix totaux (en Ar)
	Éolienne GEV MP 275	05	2.096.875	2.096.875	5.242.187.500
	Convertisseurs chargeurs Multiplus VICTRON	550	2495,95	1.372.772,5	3.431.931.250
	Batterie à gel VICTRON 220Ah/12V	3.255	495,95	1.614.317,25	4.035.793.125
	Onduleurs 2500W -Eco-	550	479.95	263.972,5	659.931.250
	Prix Totaux			5.347.937,25	13.369.843.125

3-7- Choix du lieu d'implantation :

Pour notre site considéré, c'est-à-dire l'UNA, on va implanter les éoliennes aux endroits comme présentés sur le plan ci-après, c'est-à-dire près du côté Sud Est à côté du bloc R+3(belle rose) des étudiants de l'UNA là où le vent est particulièrement abondant.



Figure3. 2.Plan d'installation de la centrale éolienne de l'UNA

Légende :

 : Zone d'implantation des éoliennes.

 : Lieu d'implantation de la cabine de tête, c'est à dire la maison pour installer les ACS.

3-8- Aspects techniques et environnementaux des éoliennes :

**a) Contraintes techniques :**

- Surface d'implantation :  
Afin d'éviter la provocation des turbulences, il est indispensable d'espacer les éoliennes d'une distance de :
  - 4 à 6 fois le diamètre du rotor entre deux éoliennes d'une même rangée ;
  - 7 à 9 fois le diamètre du rotor entre deux éoliennes de rangées successives.
- Absence d'obstacle :  
Pour éviter la diminution de la production et de l'augmentation des risques de fatigue des pales.
- Accessibilité :  
Du socle de l'éolienne : l'aire de travail doit d'être facilement accessible par des grues et camions pour la construction de l'éolienne.
- Proximité d'un point de connexion au réseau électrique pour réduire les coûts de raccordement.
- Perturbation :  
Du réseau, d'où la nécessité d'une puissance de court-circuit élevée et la connexion au réseau moyenne tension / haute tension.
- Critères favorables à l'implantation d'éoliennes :  
L'implantation d'un parc éolien sur un territoire doit répondre à des critères différents, d'origines techniques ou environnementales, qui ont pour objectifs :
  - d'assurer le fonctionnement des éoliennes et l'évacuation de l'électricité produite;
  - de respecter l'environnement et le patrimoine avoisinant le projet ;
  - d'organiser la disposition du parc en fonction du paysage ;
  - de faciliter le montage du projet ;
  - de respecter les activités humaines de la zone ;
  - de prendre en compte l'ensemble des servitudes techniques existantes.

**b) Contraintes environnementales :**

L'utilisation du vent comme source d'énergie n'entraîne aucune forme de pollution nuisible pour l'homme et son milieu naturel. L'emploi du vent évite le recours à l'énergie fossile et n'engendre pas d'émission de gaz à effet de serre ou provoquant des pluies acides.

Cependant, le nombre et la taille des éoliennes peuvent engendrer d'autres impacts environnementaux.

- Impact paysager :  
Les turbines sont parmi les présences verticales frappantes dans le paysage, particulièrement dans les régions rurales où le potentiel éolien est plus grand. L'évaluation de cet impact est souvent difficile puisqu'elle est subjective. Cependant, la perception des citoyens n'est pas seulement déterminée par des paramètres physiques d'un paysage mais

aussi par leur attitude envers les problèmes de pollution. Il reste que le design des éoliennes doit être conçu de façon à réduire l'impact visuel. Les facteurs à prendre en compte sont le choix soigneux de l'emplacement, la couleur et la forme. L'information aux citoyens peut également jouer en faveur de l'implantation d'éoliennes, source d'énergie « propre ».

- Nuisance sonore :

Le bruit émis par les turbines éoliennes peut être classé en deux catégories contenues de la manière dont l'oreille humaine la perçoit. Premièrement, il y a le bruit produit par le passage de l'air dans l'hélice. Deuxièmement, il y a celui provenant de la rotation des éléments mécaniques, tels que les boîtes d'engrenages et les génératrices. L'impact du bruit peut être minimisé par un choix judicieux de l'emplacement de l'éolienne par rapport aux caractéristiques topographiques et à la proximité des habitations. Il faut respecter, au minimum une distance de 200 à 250 mètres entre l'éolienne et les maisons.

En général, l'échelle du bruit des éoliennes se trouve dans une plage de 40 à 50 décibels (dB).

- Perturbation de la faune et de la flore :

Actuellement, ces perturbations ne sont pas encore suffisamment bien étudiées, excepté celles concernant les oiseaux. L'importance écologique du site doit donc être prise en compte lors de l'installation de l'éolienne. Les éoliennes peuvent avoir deux effets sur les oiseaux : la collision directe et la réduction de leur habitat. Mieux vaut prévoir et prendre des précautions en évitant, par exemple, les couloirs de migration des oiseaux, la proximité d'une « réserve naturelle » ou d'une zone humide.

- Ombre portée des pales :

Il est préférable de vérifier la portée de l'ombre produite par les pales sur les habitations car cela pouvant entraîner des nuisances.

## CHAPITRE IV - MODELISATION ET SIMULATION DU SYSTEME DE PRODUCTION

Dans ce quatrième chapitre, on va développer la modélisation des systèmes de production en se référant à la configuration représentée sur la figure ci-dessous.

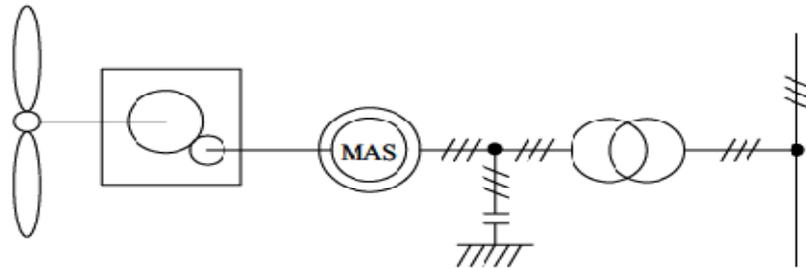


Figure4. 1. Système éolien utilisant la génératrice asynchrone à cage

### 4.1 Modèle du système de production éolien :

Dans cette sous partie, on va s'intéresser à la modélisation du système permettant de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. On utilisera la machine asynchrone à cage comme génératrice.

#### 4.1.1 Modélisation de la turbine :

En rappelant ce qu'on a déjà parlé dans le premier chapitre, si  $R_t$  est le rayon de la turbine, la surface balayée par la turbine est égale à :

$$S_t = \pi \cdot R_t^2. \quad (4.1)$$

Pour une vitesse du vent  $V_e$ , la puissance éolienne ou puissance du vent  $P_e$  se traduit par la formule suivante :

$$P_e = \frac{\rho \cdot S_t \cdot V_e^3}{2}. \quad (4.2)$$

Où  $\rho$  est la masse volumique de l'air.

L'aérogénérateur ne peut en aucun cas capter toute puissance du vent, mais une partie seulement, et s'écrit sous forme :

$$P_t = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot S_t \cdot V_e^3; \quad (4.3)$$

$$P_t = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_t^2 \cdot V_e^3. \quad (4.4)$$

$P_t$  : puissance aérodynamique de la turbine ;

$C_p$  : coefficient de puissance aérodynamique.

Avec  $C_p = f(\lambda, \beta)$  :  $\beta$  (angle d'orientation des pales) et  $\lambda$  vitesse normalisée qui est fonction de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine et de la vitesse de vent.

$$\lambda = \frac{R_t \cdot \Omega_t}{V_e}. \quad (4.5)$$

$\Omega_t$  : vitesse de rotation de la turbine.

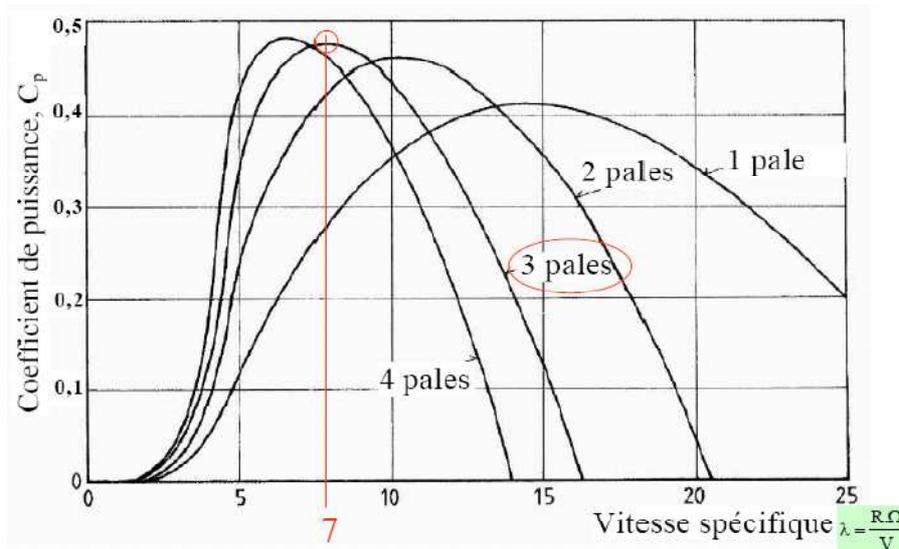


Figure4. 2.Coefficient de puissance en fonction de  $\lambda$

D'après la théorie de Betz la valeur maximale du coefficient de puissance est de 0.59

Le couple produit à partir de la puissance captée sur la turbine s'écrit alors sous la forme :

$$T_t = \frac{P_t}{\Omega_t}; \tag{4.6}$$

$$T_t = \frac{\rho \cdot \pi \cdot R_t^2 \cdot V_e^3}{2\Omega_t} C_p = \frac{\rho \cdot \pi \cdot R_t^3 \cdot V_e^2}{2\lambda} C_p . \tag{4.7}$$

Le coefficient de puissance est aussi lié à un coefficient appelé « **coefficient du couple  $C_t$**  », qui a comme expression :

$$C_t = \frac{C_p}{\lambda} . \tag{4.8}$$

Alors l'expression du couple devient :

$$T_t = \frac{\rho \cdot \pi \cdot R_t^3 \cdot V_e^2}{2} C_t . \tag{4.9}$$

#### 4.1.2 Modélisation de la machine asynchrone :

##### 4.1.2.1 Fonctionnement de la machine asynchrone :

Une machine asynchrone est machine électrique réversible, elle peut fonctionner en mode moteur ou en mode générateur. Pour pouvoir l'utiliser comme générateur, il faut que la vitesse de rotation de la machine soit supérieure à la vitesse du synchronisme.

En effet, en couplant la machine au réseau, le stator y est branché, le réseau fournit la puissance réactive nécessaire pour la création du champ tournant, mais la vitesse de rotation est peu élevée. Il faut coupler mécaniquement le rotor de la machine asynchrone à l'arbre de transmission de la turbine par l'intermédiaire du multiplicateur de vitesse. Voici alors l'évolution du couple en fonction de la vitesse pour une machine asynchrone.

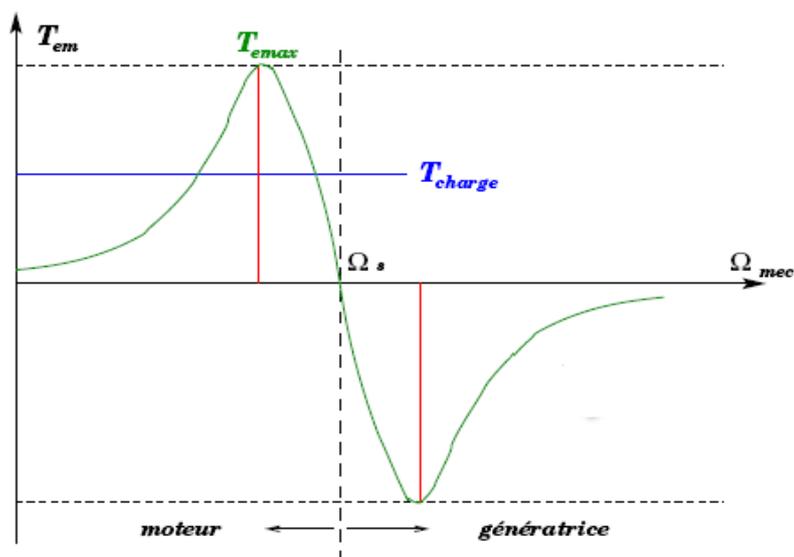


Figure4. 3.Caractéristique couple-vitesse d'une machine asynchrone

4.1.2.2 Schéma équivalent de la machine asynchrone :

La figure ci-dessous représente le schéma équivalent simplifié d'une machine asynchrone par analogie avec un transformateur dont le circuit secondaire est ramené au primaire : le rotor est ramené au stator.

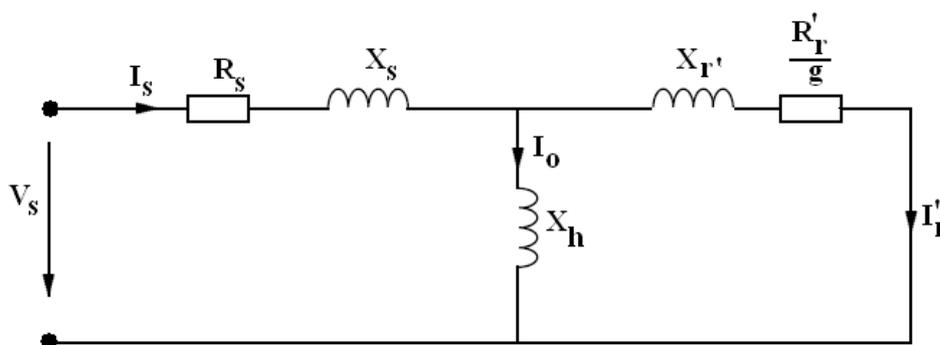


Figure4. 4.Schéma équivalent simplifié de la machine asynchrone

$V_s$  : la tension de phase au stator

$g$ : glissement de la machine

$I_s$  : le courant statorique

$I'_r$  : le courant rotorique ramené au stator

$I_0$  : courant à vide

$X_s, X'_r$  : les réactances de fuites

$X_h$  : réactance principale

$R_s$  : résistance de l'enroulement statorique

$R'_r$  : résistance de l'enroulement rotorique ramené au stator

En fait, la résistance  $R'_r/g$  peut se décomposer en deux résistances :

$$\frac{R'_r}{g} = R'_r + R'_r \left( \frac{1-g}{g} \right) \tag{4.10}$$

Le terme  $R'_r$  représente la résistance de l'enroulement rotorique, tandis que le second terme  $R'_r(1-g)/g$  est une résistance fictive qui traduit la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique.

Le glissement de la machine est donné par la formule suivant :

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (4.11)$$

Le glissement  $g$  est négatif pour un générateur car  $n_s < n$

$\Omega_s, \Omega$  les vitesses angulaires du champ tournant et du rotor ;  $n_s, n$  vitesses du synchronisme et du rotor.

#### 4.1.2.3 Modélisation mathématique du générateur asynchrone :

##### ▪ **Modèle de tensions**

Dans une machine électrique, la tension induite aux bornes d'un circuit se traduit par l'équation :

$$V = Ri + \frac{d\psi}{dt} \quad (4.12)$$

Où  $R$  est la résistance du circuit,  $i$  le courant qui le traverse et  $\psi$  le flux totalisé du circuit.

Les équations de tension pour l'ensemble des enroulements statorique et rotorique s'écrivent :

$$\begin{cases} V_{s1} = R_s i_{s1} + \frac{d\Psi_{s1}}{dt}; \\ V_{s2} = R_s i_{s2} + \frac{d\Psi_{s2}}{dt}; \\ V_{s3} = R_s i_{s3} + \frac{d\Psi_{s3}}{dt}; \end{cases} \quad \begin{cases} 0 = R_r i_{r1} + \frac{d\Psi_{r1}}{dt}; \\ 0 = R_r i_{r2} + \frac{d\Psi_{r2}}{dt}; \\ 0 = R_r i_{r3} + \frac{d\Psi_{r3}}{dt}. \end{cases} \quad (4.13)$$

$s$  et  $r$  désignent les paramètres statorique et rotorique ; 1, 2,3 représentent les trois phases des enroulements.

En utilisant la notation matricielle, les équations de tensions deviennent :

$$\begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_{s3} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{s1} \\ \Psi_{s2} \\ \Psi_{s3} \end{bmatrix}; \quad (4.14)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{r1} \\ i_{r2} \\ i_{r3} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{r1} \\ \Psi_{r2} \\ \Psi_{r3} \end{bmatrix}.$$

##### ▪ **Modèle de flux**

Le flux totalisé  $\psi$  est la somme des inductances cycliques statorique ou rotorique et des inductances mutuelles entre le stator et le rotor.

Le flux totalisé au stator et au rotor est donné par la formule :

$$\begin{aligned} \Psi_{s1} &= L_{s1} i_{s1} + M i_{r1}; & \Psi_{r1} &= L_{r1} i_{r1} + M i_{s1}; \\ \Psi_{s2} &= L_{s2} i_{s2} + M i_{r2}; & \Psi_{r2} &= L_{r2} i_{r2} + M i_{s2}; \\ \Psi_{s3} &= L_{s3} i_{s3} + M i_{r3}; & \Psi_{r3} &= L_{r3} i_{r3} + M i_{s3}. \end{aligned} \quad (4.15)$$

$L_s, L_r$  : les inductances cycliques statorique et rotorique

$M$  : les inductances mutuelles entre le stator et le rotor

$$\begin{aligned} L_s &= l_s - m_s; \\ L_r &= l_r - m_r. \end{aligned} \quad (4.16)$$

$l_s, l_r$  : inductances propres d'une phase statorique et rotorique ;

$m_s, m_r$  : inductances mutuelles entre deux phases statoriques et deux phases rotoriques.

La notation matricielle est :

$$\begin{cases} [\Psi_s]_{123} = [L_s]_{123}[i_s]_{123} + [M]_{123}[i_r]_{123}; \\ [\Psi_r]_{123} = [L_r]_{123}[i_r]_{123} + [M]_{123}[i_s]_{123}. \end{cases} \quad (4.17)$$

Pour faciliter la modélisation du générateur, on procède à un changement de base qui permet d'avoir d'autres équations matricielles équivalentes, représentant une structure plus simple pour la modélisation. Ceci fait appel à la transformation de Park.

#### 4.1.2.4 Changement de base par la transformation de Park :

La transformation de Park consiste à changer la base des équations précédentes en diagonalisant les matrices « inductances ».

L'indice « 1, 2, 3 » désignant le circuit triphasé du stator et du rotor est remplacé par le triplet (d, q, o) où d est l'axe direct ; q l'axe transversal ; et o l'axe homopolaire.

Le passage d'un paramètre d'une base à l'autre se fait à partir d'une matrice de changement de base P définie par :

$$[P] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta & -\sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}. \quad (4.18)$$

La matrice [P] est appelée « matrice de Park »

Le changement de base s'écrit :

$$(Z_{ab}) = [P](Z_{nb}). \quad (4.19)$$

Où ab désigne l'ancienne base et nb la nouvelle base.

Alors pour une matrice [Z], le changement de base donne :

$$(Z_{nb}) = [P]^{-1}(Z_{ab})[P]. \quad (4.20)$$

$[P]^{-1}$  désigne la « matrice de Park inverse ». La matrice de Park est inversible car  $\det [P] \neq 0$ .

$$[P]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.21)$$

#### 4.1.2.5 Changement de base des modèles précédents :

Dans un repère de Park, on notera par  $\theta_s$  l'angle pour le stator et  $\theta_r$  celui pour le rotor. Ces deux paramètres angulaires sont fonction du temps. Il est à noter que les 3 vecteurs qui constituent le repère de Park est orthonormé deux à deux, la matrice de changement de base étant orthonormé ; ce qui facilite la détermination de la matrice inverse.

En choisissant un référentiel lié au stator, alors la matrice de changement de base est :

$$[P] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_s & \cos\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_s + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta_s & -\sin\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}. \quad (4.22)$$

Et la matrice inverse sera :

$$[P]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_s & -\sin \theta_s & 1 \\ \cos\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta_s + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_s + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.23)$$

Par la transformation de Park les équations qu'on a vues ci-dessus, deviennent :

#### ▪ Équations de tension

Au stator

$$V_{sd} = R_s \cdot i_{sd} - \omega_s \Psi_{sq} + \frac{d\Psi_{sd}}{dt}; \quad (4.24)$$

$$V_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \omega_s \Psi_{sd} + \frac{d\Psi_{sq}}{dt}.$$

Au rotor (rotor en court-circuit)

$$0 = R_r \cdot i_{rd} - \omega_r \Psi_{rq} + \frac{d\Psi_{rd}}{dt}; \quad (4.25)$$

$$0 = R_r \cdot i_{rq} + \omega_r \Psi_{rd} + \frac{d\Psi_{rq}}{dt}.$$

▪ **Equations de flux**

Les équations de flux statoriques sont exprimées par :

$$\Psi_{sd} = L_s \cdot i_{sd} + M i_{rd}; \quad (4.26)$$

$$\Psi_{sq} = L_s \cdot i_{sq} + M i_{rq}.$$

Symétriquement, au niveau du rotor on a :

$$\Psi_{rd} = L_r \cdot i_{rd} + M i_{sd}; \quad (4.27)$$

$$\Psi_{rq} = L_r \cdot i_{rq} + M i_{sq}.$$

▪ **Equation des courants en fonction des flux totalisés**

Ils s'écrivent sous forme :

$$i_{rd} = \frac{1}{L_r} (\Psi_{rd} - M i_{sd}); \quad (4.28)$$

$$i_{rq} = \frac{1}{L_r} (\Psi_{rq} - M i_{sq}).$$

Alors les expressions des flux totalisés deviennent :

Au stator

$$\Psi_{sd} = \frac{M}{L_r} \cdot \Psi_{rd} + \left( L_s - \frac{M}{L_r} \right)^2 i_{sd}; \quad (4.29)$$

$$\Psi_{sq} = \frac{M}{L_r} \cdot \Psi_{rq} + \left( L_s - \frac{M}{L_r} \right)^2 i_{sq}.$$

Au rotor

$$\Psi_{rd} = \frac{M}{L_r} \cdot \Psi_{sd} + \left( L_s - \frac{M}{L_r} \right)^2 i_{rd}; \quad (4.30)$$

$$\Psi_{rq} = \frac{M}{L_r} \cdot \Psi_{sq} + \left( L_s - \frac{M}{L_r} \right)^2 i_{rq}.$$

Avec :

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \quad \text{Coefficient de Blondel.} \quad (4.31)$$

Il existe aussi d'autres modèles qui vont s'ajouter à ceux des précédents, qui sont à la fois importants pour la modélisation du générateur synchrone.

▪ **Modèle de puissances**

La puissance instantanée est donnée par la formule :

$$P_{si} = V_{s1} \cdot i_{s1} + V_{s2} \cdot i_{s2} + V_{s3} \cdot i_{s3} = \frac{3}{2} (V_{sd} \cdot i_{sd} + V_{sq} \cdot i_{sq}). \quad (4.32)$$

Tout en considérant que le terme homopolaire est nul, la transformation de Park conserve la puissance instantanée.

En remplaçant les valeurs de  $V_{s1}$ ,  $V_{s2}$  et  $V_{s3}$  l'expression de la puissance devient :

$$P_{si} = \frac{3}{2} \left\{ \left[ R_s \cdot i_{sd} - \omega_s \Psi_{sq} + \frac{d\Psi_{sd}}{dt} \right] \cdot i_{sd} + \left[ R_s \cdot i_{sq} + \omega_s \Psi_{sd} + \frac{d\Psi_{sq}}{dt} \right] \cdot i_{sq} \right\}. \quad (4.33)$$

On a alors :

$$P_{si} = \frac{3}{2} (R_s \cdot i_{sd}^2 + R_s \cdot i_{sq}^2) + \frac{3}{2} \left( \frac{d\Psi_{sd}}{dt} \cdot i_{sd} + \frac{d\Psi_{sq}}{dt} \cdot i_{sq} \right) + \frac{3}{2} \omega_s (\Psi_{sd} i_{sq} - \Psi_{sq} i_{sd}). \quad (4.34)$$

Le premier terme représente les pertes joules, le second terme indique la puissance électromagnétique emmagasinée dans le champ ; et le troisième terme désigne la puissance mécanique produite. La puissance active ainsi que la puissance réactive sont donnée par les formules :

$$\begin{aligned} P_a &= V_{sd} i_{sd} + V_{sq} i_{sq}; \\ P_r &= V_{sd} i_{sq} - V_{sq} i_{sd}. \end{aligned} \quad (4.35)$$

#### ▪ Equation du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique développé par le champ tournant est obtenu en divisant le troisième terme de la puissance instantanée par  $\Omega_s$  la vitesse angulaire de rotation du champ tournant:

$$T_{em} = \frac{\frac{3}{2} \omega_s (\Psi_{sd} i_{sq} - \Psi_{sq} i_{sd})}{\Omega_s}; \quad (4.36)$$

$$T_{em} = \frac{3}{2} p (\Psi_{sd} i_{sq} - \Psi_{sq} i_{sd}).$$

En remplaçant les flux par leurs expressions, on a :

$$T_{em} = \frac{3}{2} p [(L_s \cdot i_{sd} + M i_{rd}) + (L_s \cdot i_{sq} + M i_{rq})] \quad (4.37)$$

Par conséquent, une autre expression du couple se présente :

$$T_{em} = \frac{3}{2} p M (i_{rd} \cdot i_{sq} - i_{rq} \cdot i_{sd}) \quad (4.38)$$

En faisant appel aux flux rotoriques :

$$\Psi_{rd} = L_r \cdot i_{rd} + M i_{sd} \text{ soit } i_{rd} = \frac{\Psi_{rd}}{L_r} - \frac{M i_{sd}}{L_r}; \quad (4.39)$$

$$\Psi_{rq} = L_r \cdot i_{rq} + M i_{sq} \text{ soit } i_{rq} = \frac{\Psi_{rq}}{L_r} - \frac{M i_{sq}}{L_r}.$$

Alors, une troisième expression du couple électromagnétique apparait :

$$T_{em} = \frac{3M}{2L_r} p (\Psi_{rd} i_{sq} - \Psi_{rq} i_{sd}). \quad (4.40)$$

**NB :**  $p$  est le nombre de paires de pôles du générateur.

Ainsi, le couple électromagnétique développé par le champ tournant est modélisé par trois équations qui résultent de l'interaction d'un terme flux et d'un terme courant :

$$\begin{cases} T_{em} = \frac{3}{2} p (\Psi_{sd} i_{sq} - \Psi_{sq} i_{sd}); \\ T_{em} = \frac{3}{2} p M (i_{rd} \cdot i_{sq} - i_{rq} \cdot i_{sd}); \\ T_{em} = \frac{3M}{2L_r} p (\Psi_{rd} i_{sq} - \Psi_{rq} i_{sd}). \end{cases} \quad (4.41)$$

#### ▪ Modèle du mouvement du générateur

La relation fondamentale de la dynamique exprime l'équation du mouvement du générateur par la formule :

$$T_{em} - T_r = J \frac{d\Omega_r}{dt}. \quad (4.42)$$

Avec :

$$\omega_s = p\Omega - \omega_r. \quad (4.43)$$

Où  $T_{em}$  : le couple électromagnétique ;

$T_r$  : le couple résistant ;

$p$  : nombre de paires de pôles ;

$J$  : moment d'inertie totale (inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et l'inertie de génératrice).

#### 4.2 Simulation et analyse des systèmes de production :

Cette partie consiste à développer la simulation des modèles avec Matlab sous simulink. D'abord, on va traduire les modèles mathématiques de chaque système à des schémas blocs, puis simuler ces derniers.

##### 4.2.1 Simulation du vent :

La vitesse du vent peut être considérée comme une fonction scalaire qui évolue en fonction du temps:

$$V_v = f(t). \quad (4.44)$$

La vitesse du vent sera modélisée, dans cette étude, sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques sous la forme :

$$V_v(t) = A + \sum_{n=1}^i (a_n \cdot \sin(b_n \cdot w_v \cdot t)). \quad (4.45)$$

L'équation qui illustre la variation de la vitesse du vent  $V_e(t)$  utilisée dans la simulation est donc :

$$V_e(t) = 8 + 2 \sin \omega t - 2 \sin 3\omega t + 1.5 \sin 5\omega t + 0.5 \sin 10\omega t + 0.5 \sin 50\omega t; \quad (4.46)$$

Avec  $\omega = 2\pi/10$ .

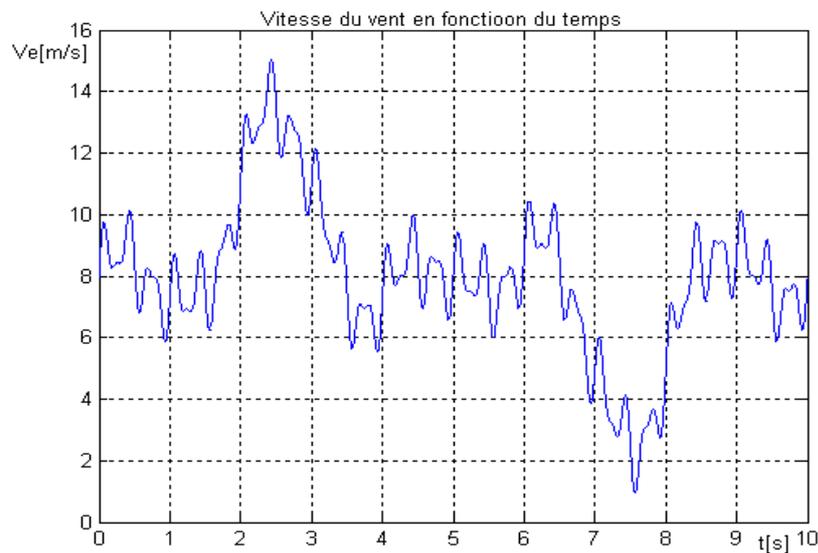


Figure4. 5. Courbe d'évolution de la vitesse du vent dans le temps.

4.2.2 Simulation du système éolien :

4.2.2.1 Simulation de la turbine :

a) **Schéma bloc**

Les modèles mathématiques de la turbine nous permettent d'avoir le schéma suivant.

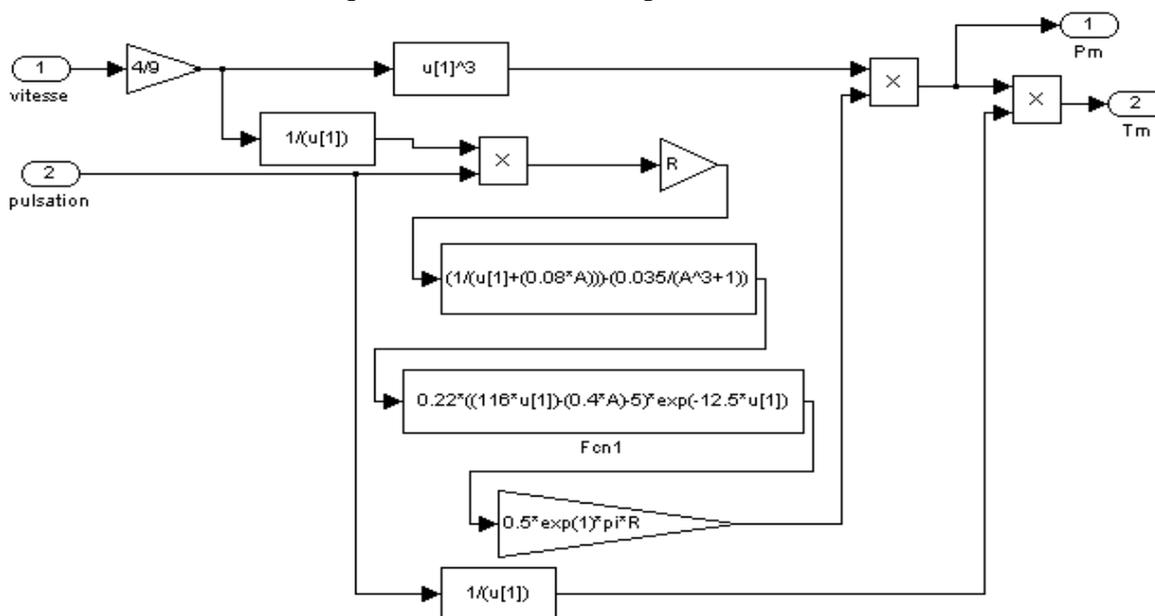


Figure4. 6.Modèle de la turbine sous simulink

La figure suivante représente le schéma bloc qui désigne la turbine éolienne avec deux variables de sortie : la puissance et le couple mécanique.

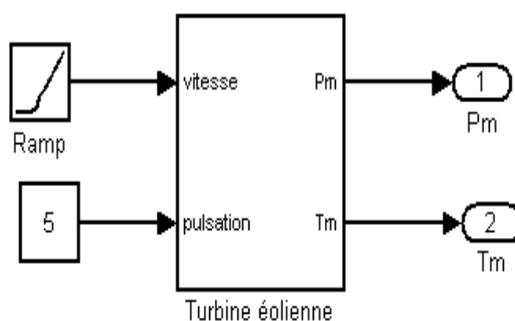


Figure4. 7.Schéma bloc de la turbine

**b) Résultats de la simulation**

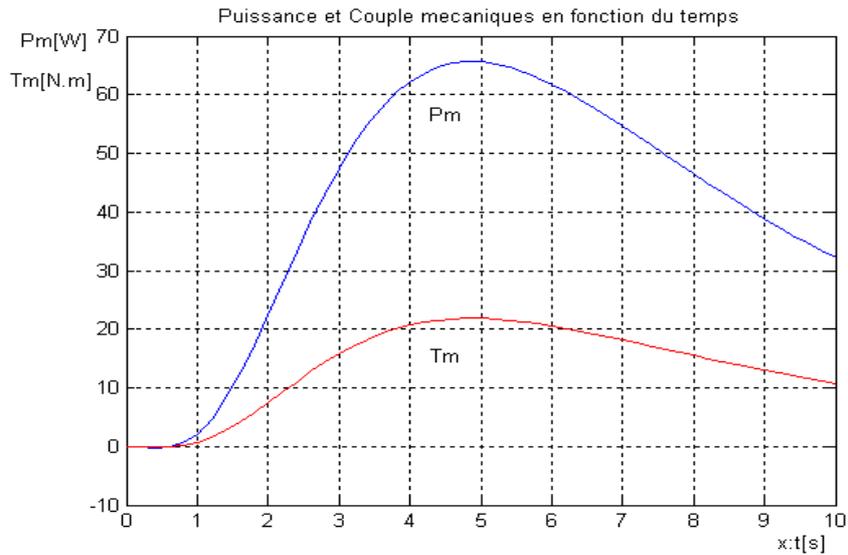


Figure4. 8.Puissance et couple mécanique de la turbine (pour  $\omega = 3[\text{rad/s}]$ )

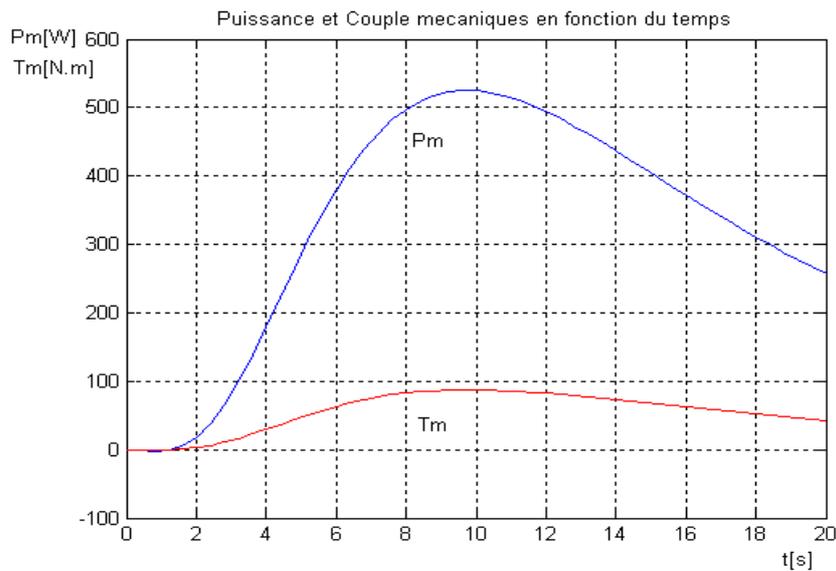


Figure4. 9.Puissance et couple mécanique de la turbine (pour  $\omega = 6[\text{rad/s}]$ )

Les figures (4.8) et (4.9) nous donnent les variations du couple mécanique et celle de la puissance mécanique de la turbine avec pulsation  $\omega$  égale  $3[\text{rad/s}]$  et  $6[\text{rad/s}]$ . On remarque que l'augmentation de cette dernière entraîne la montée de la puissance ainsi que l'allure du couple donc de la vitesse de rotation de la turbine. Cependant, chaque fois qu'on augmente la pulsation, la période transitoire du fonctionnement de la turbine s'augmente proportionnellement à sa variation. L'allure de ces courbes est dictée par l'allure de la vitesse du vent, où dans le cas présent elle est représentée par un signal en rampe.

4.2.2.2 Simulation de la machine asynchrone :

a) **Schéma bloc**

On rappelle que la modélisation de la machine s'est effectuée par la transformation de Park, une transformation qui rend facile la simulation de la machine. Les modèles mathématiques se traduisent sous forme de schéma suivant :

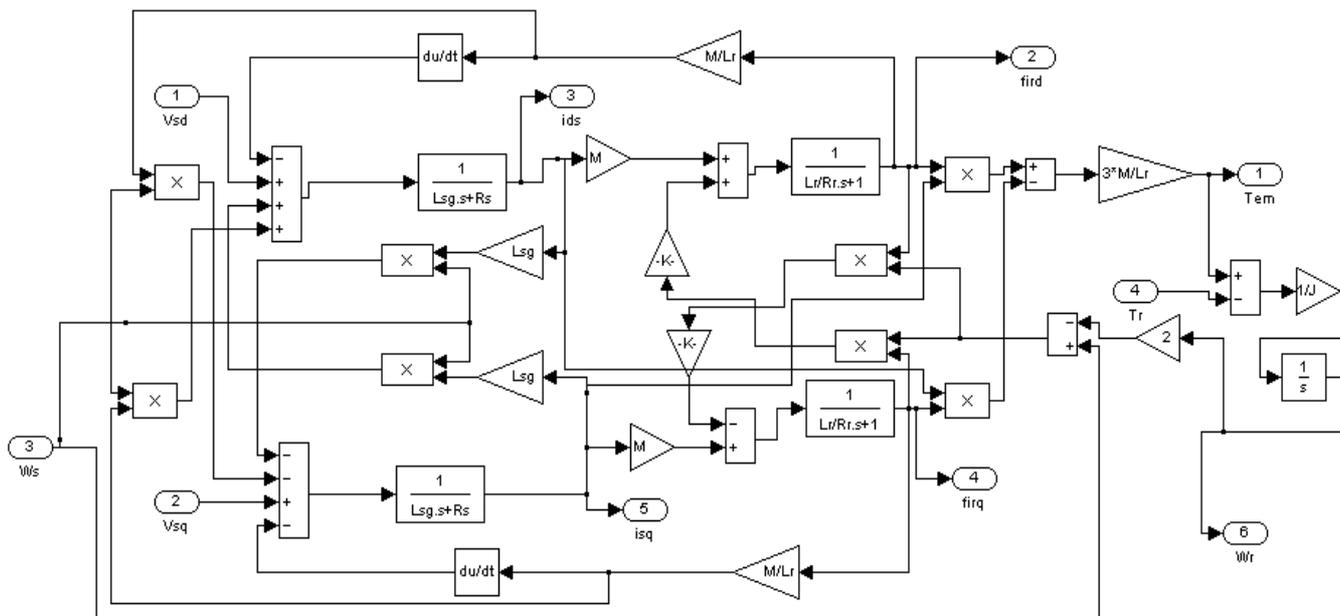


Figure4. 10.Schéma de la machine asynchrone sous Simulink

Pour réaliser la simulation, on doit alimenter la machine par une source triphasée : la source est reliée au bloc de transformation direct de Park, ceci permet d'avoir une source de tension et de courant sous la base de Park reliée directement à la machine. Par la transformation inverse de Park, on aura les courants réels qui circulent au stator de la machine.

Voici les schémas blocs de la source triphasée (Figure4.11), les blocs de transformation directe et inverse de Park (Figure4.12).

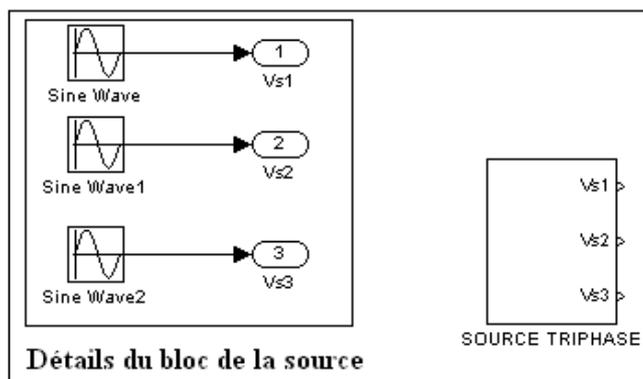


Figure4. 11.Schéma bloc de la source triphasée

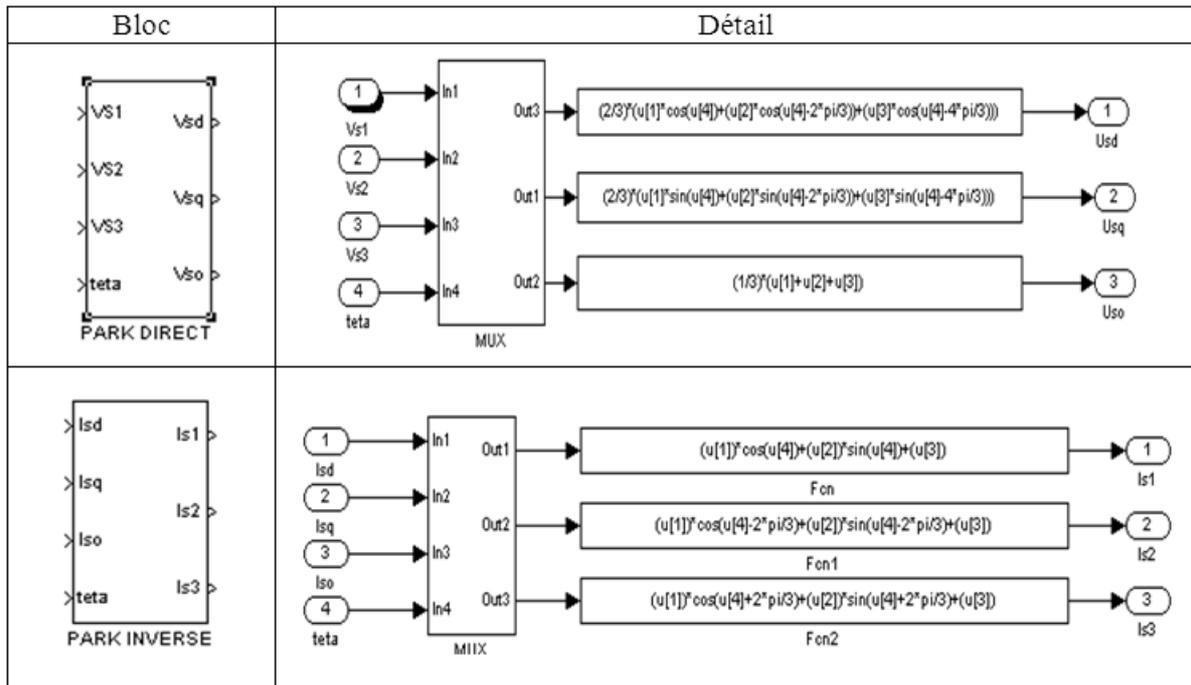


Figure4. 12.Blocs de transformation de Park

Le schéma de l'ensemble se présente comme suit

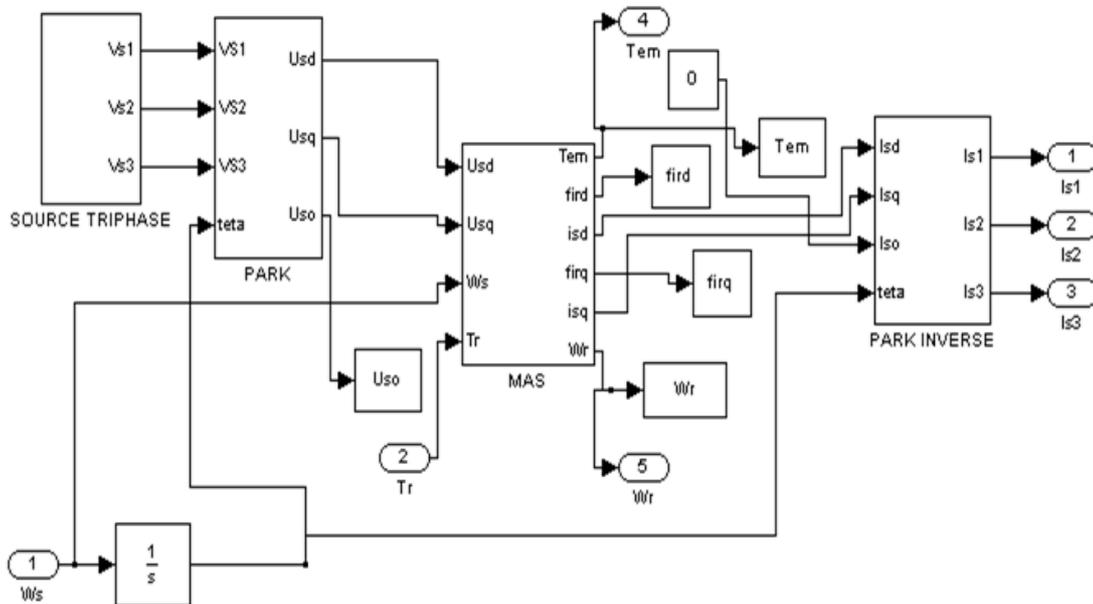


Figure4. 13.Schéma de simulation de la machine asynchrone

La figure ci-après donne les paramètres introduits dans le bloc MAS

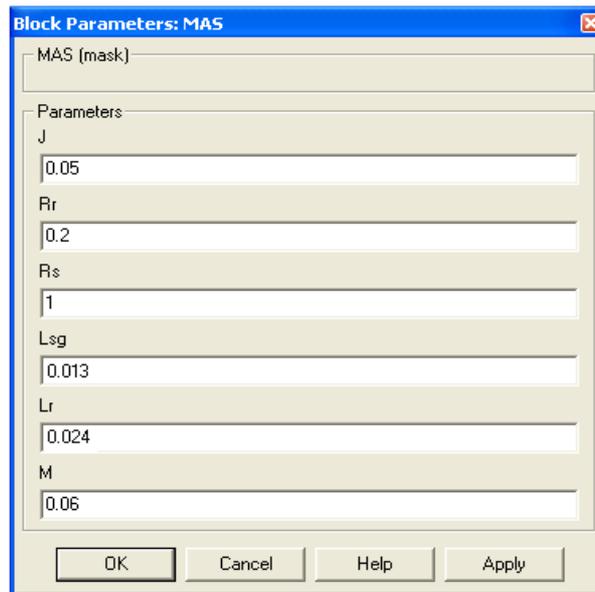


Figure4. 14.Paramètres de la machine asynchrone

**b) Résultats de la simulation**

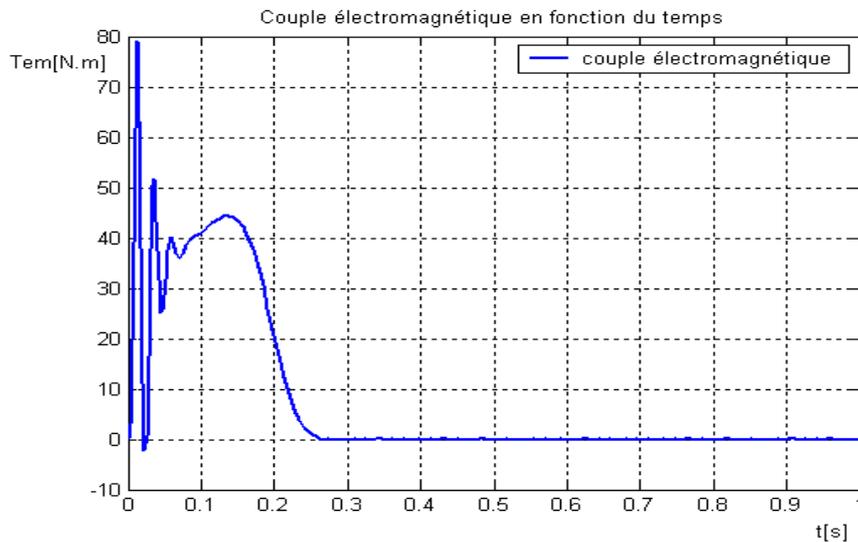


Figure4. 15.Couple électromagnétique en fonction du temps

La variation du couple s'explique par le fait qu'au démarrage ou pendant le régime transitoire, le système est encore instable jusqu'à  $t= 0.1[s]$ . Puis il se stabilise, et à  $t=0.15[s]$ , enfin il tend vers zéro pendant le régime permanent puisque le couple résistant est nul.

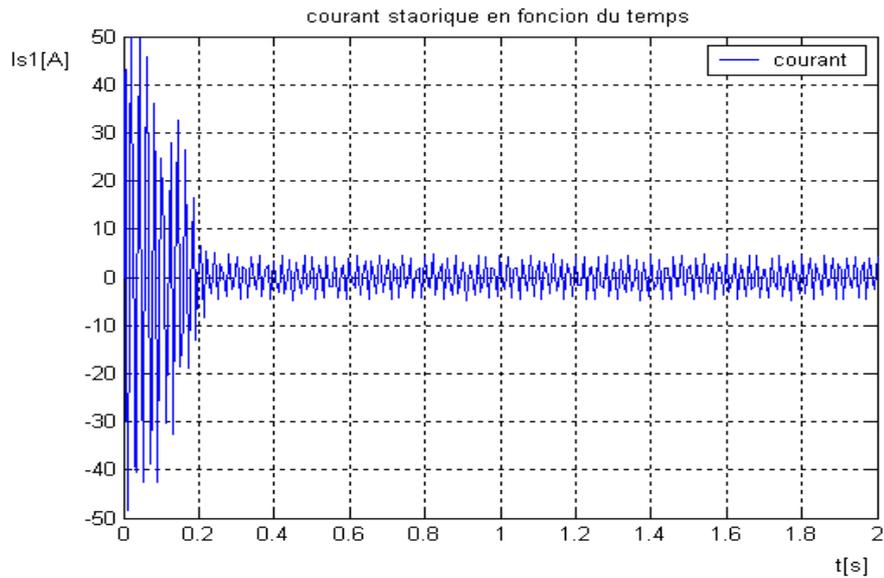


Figure4. 16.Courant statorique en fonction du temps

La machine a subi un appel de courant important au démarrage, dans notre cas le courant au démarrage est environ 6 fois le courant nominal. Mais, à partir de l'instant 0.2[s] le régime permanent est atteint, il reste le courant correspondant au comportement inductif de la machine à vide.

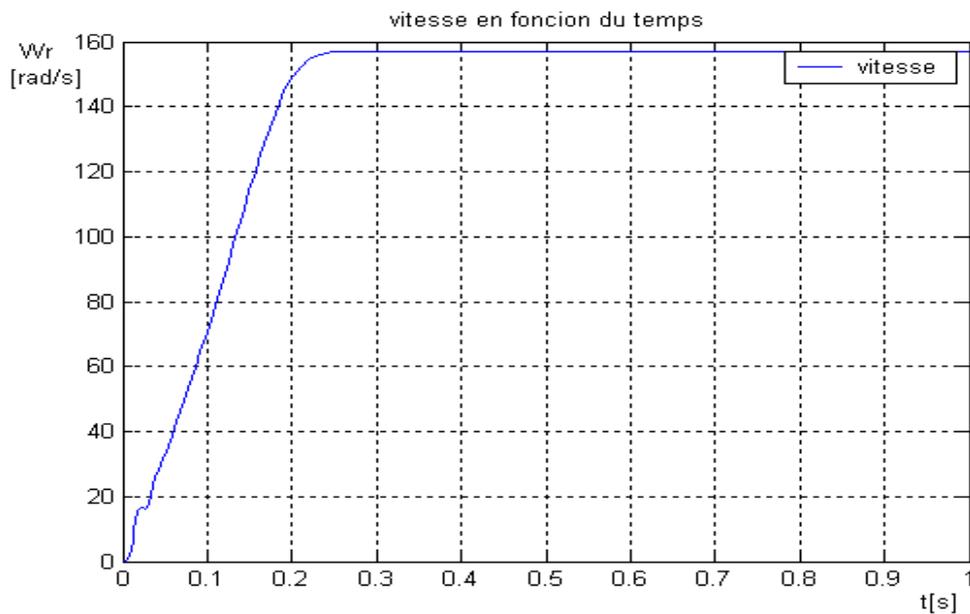


Figure4. 17.Vitesse du rotor en fonction du temps

Du côté de la vitesse, on constate qu'elle croit linéairement pendant le régime transitoire. On peut donc dire que l'appel du courant au démarrage a son effet sur la vitesse de rotation du rotor car elle a atteint le maximum à  $t=0.2$ [s], c'est le début du régime permanent.

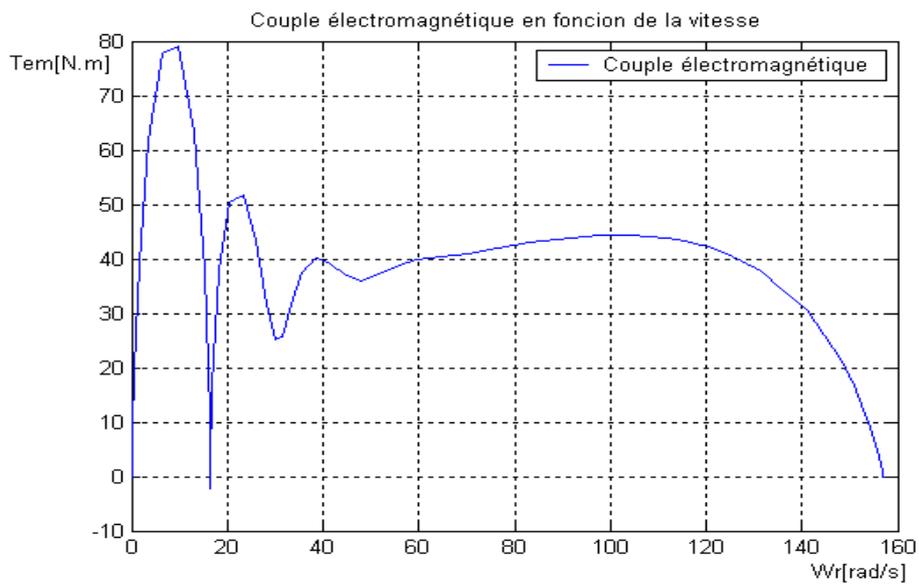


Figure4. 18.Couple électromagnétique en fonction de la vitesse rotorique

La figure 4.18 nous montre que le couple électromagnétique de la machine augmente toujours avec la vitesse de rotation après le régime transitoire. Cependant, il diminue en s'approchant de la vitesse de synchronisme là où il va s'annuler étant donné que le couple résistant est nul.

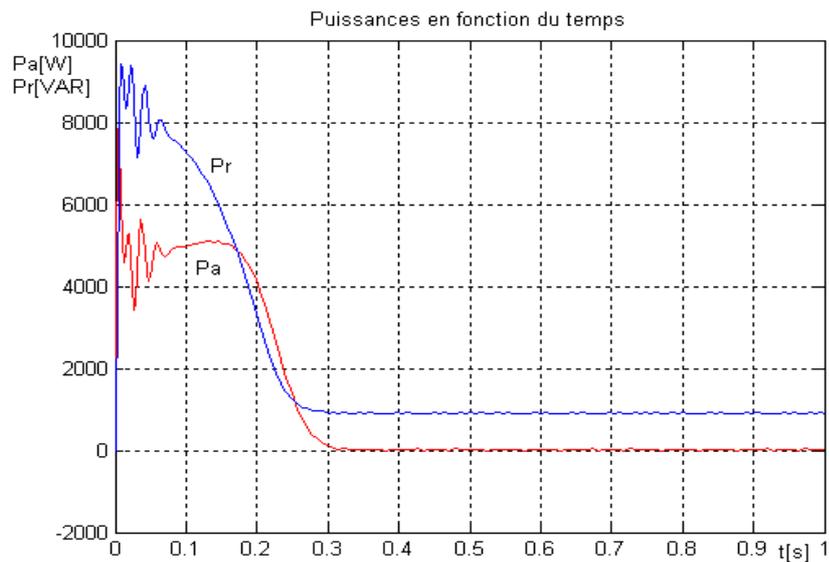


Figure4. 19.Puissances active et réactive en fonction du temps

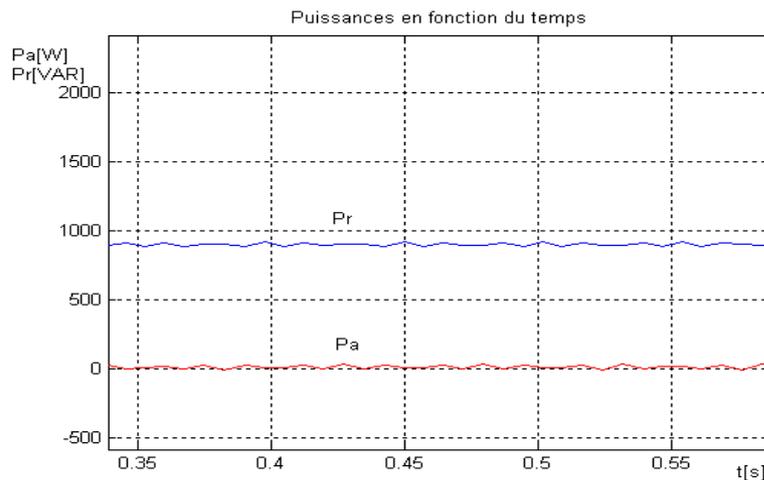


Figure4. 20. Vue agrandie de la figure 4.19 à  $t = 0.6[s]$

En considérant les courbes de puissances en fonction du temps, la machine fonctionne en régime moteur. Cela se justifie par rapport aux signes des puissances active et réactive : la puissance active est positive, c'est-à-dire que la machine absorbe de la puissance active de la source d'alimentation ; et les deux puissances sont de même signe.

#### 4.2.3 Simulation de l'ensemble du système :

On va assembler les systèmes de production (système éolien et la variation de la vitesse du vent) puis on simule le système ainsi formé.

##### 4.2.3.1 Schéma bloc du système :

On rappelle que le système de production dans l'ensemble est formé d'une source de tension triphasée équilibrée et sinusoïdale ; à partir de laquelle on alimente la machine asynchrone triphasée utilisée comme génératrice pour assurer la production en énergie électrique du système.

Mais, pour assurer le mode fonctionnement de machine asynchrone en mode générateur, le schéma va être rectifié ; on va coupler la turbine éolienne avec la machine asynchrone. Pour ce faire, on introduit le couple mécanique de la turbine dans l'équation du mouvement de la machine. Alors les trois couples (électromécanique  $T_{em}$ , résistant  $T_r$  et mécanique  $T_m$ ) vont contribuer pour entrainer la vitesse de rotation de la machine.

L'ensemble formé par la turbine et la génératrice donne le générateur éolien ou aérogénérateur.

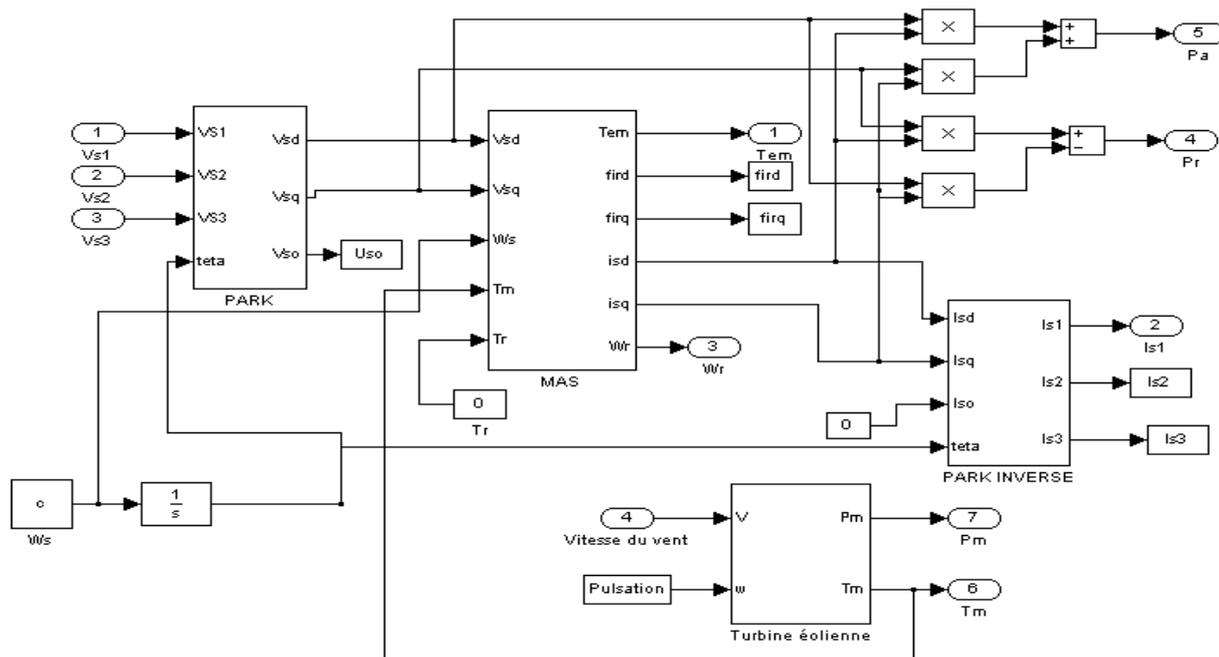


Figure4. 21.Bloc de l'aérogénérateur

Comme nous le montre la figure 4.21, le bloc de machine asynchrone est modifié par l'existence d'un nouveau paramètre d'entrée, le couple mécanique de la turbine. La figure suivante donne la nouvelle structure du contenu de la machine.

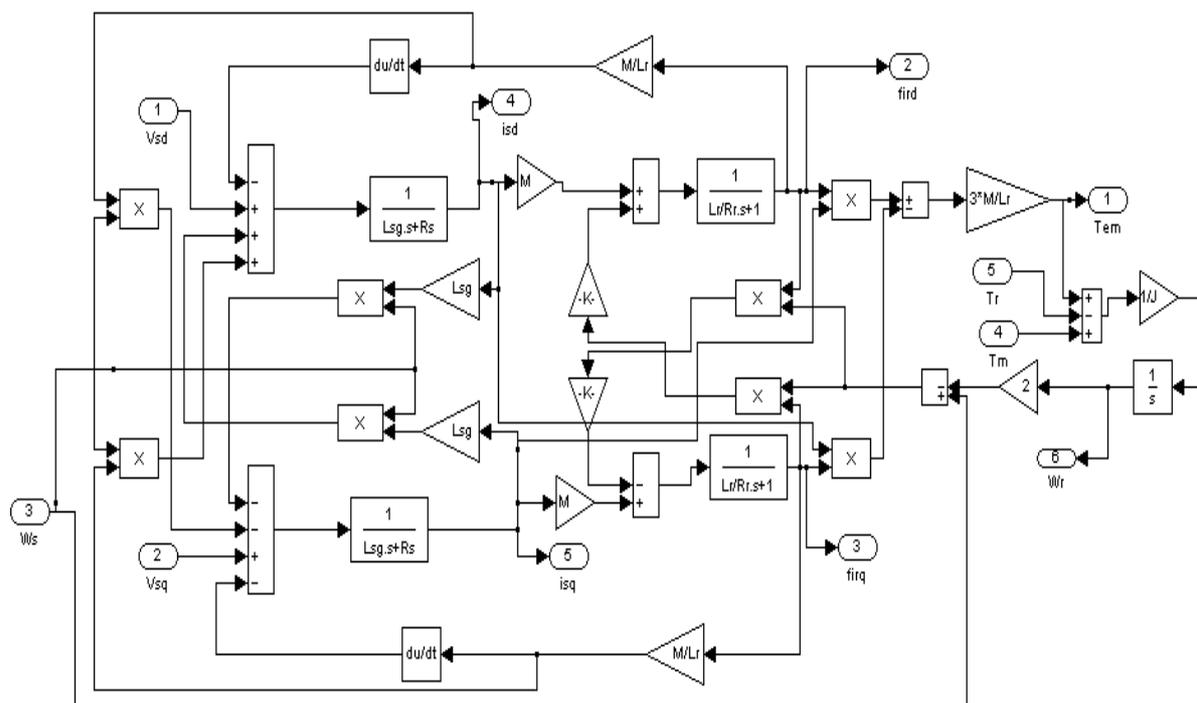


Figure4. 22.Schéma de la machine asynchrone avec modification

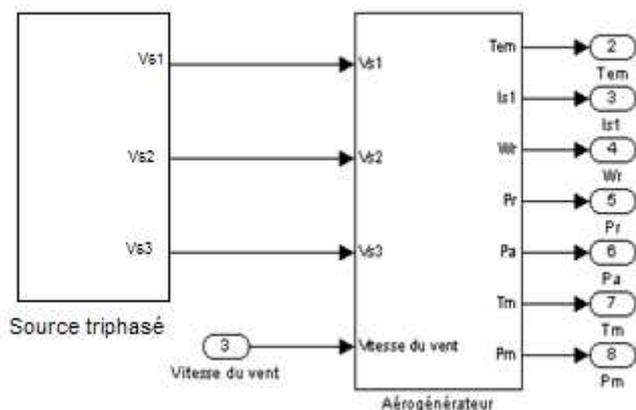


Figure4. 23.Schéma des systèmes de production éolienne

4.2.3.2 Résultats de la simulation du système :

A noter que le principal variable d'entrée est le vent qui réalise la rotation de la turbine éolienne.

Après avoir simulé les systèmes de production, on va présenter les différents résultats obtenus.

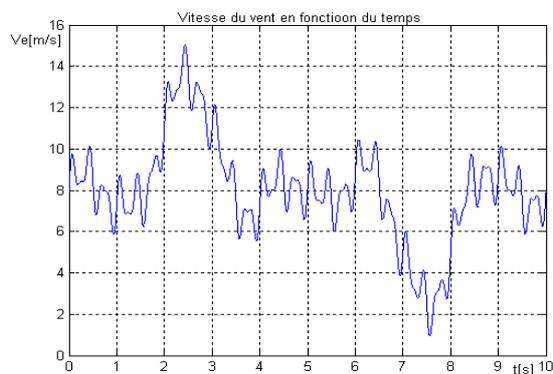


Figure4. 24.Courbe de variation de la vitesse du vent

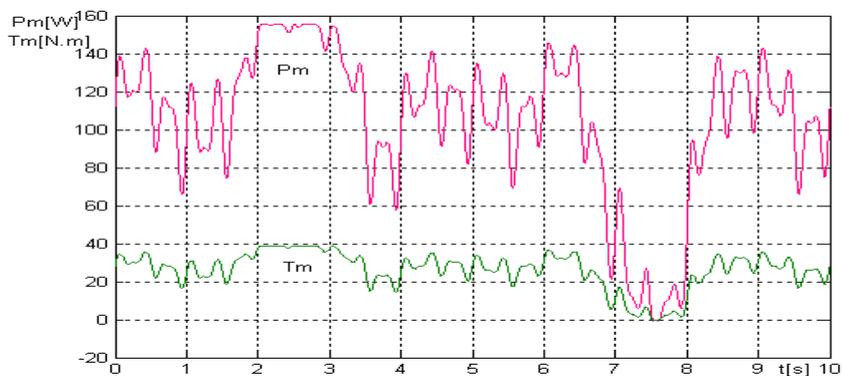


Figure4. 25.Puissance et couple mécaniques de la turbine

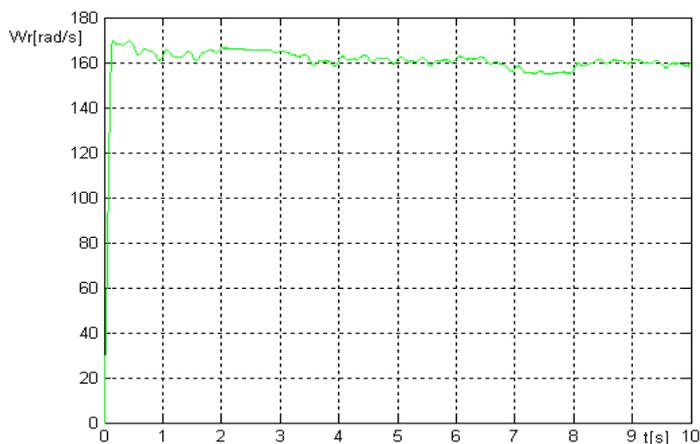


Figure4. 26. Vitesse de rotation de la génératrice en fonction du temps

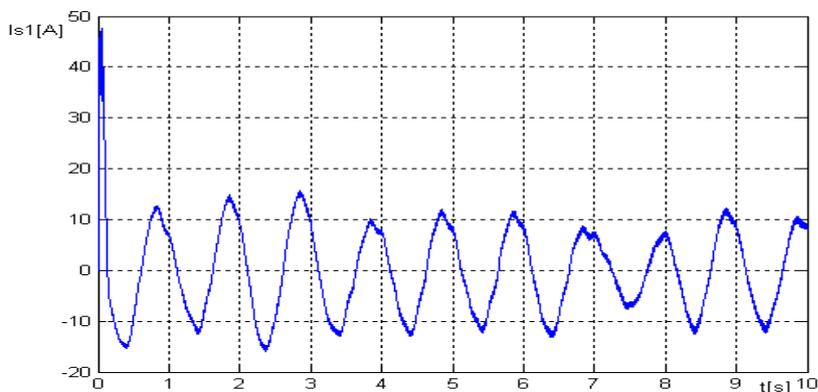


Figure4. 27. Courant statorique en fonction du temps

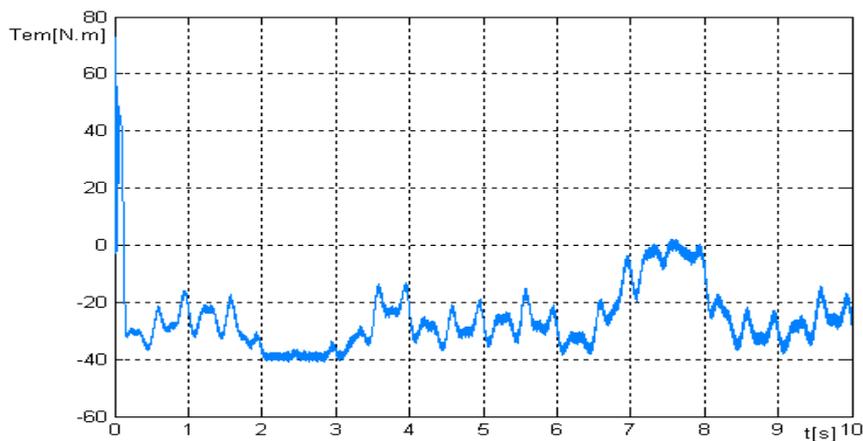


Figure4. 28. Couple électromagnétique en fonction du temps

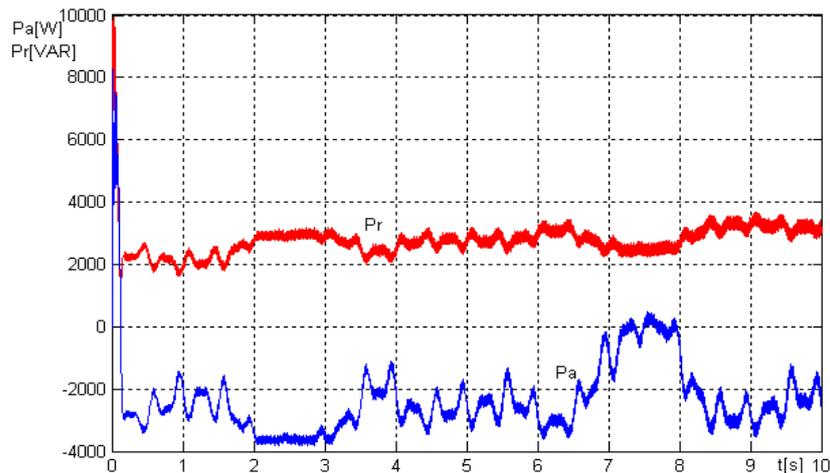


Figure4. 29.Puissances active et réactive en fonction du temps

#### 4.2.3.3 Interprétation des résultats :

On constate que l'effet de la variation de la vitesse du vent est très important sur l'ensemble des systèmes de production : elle varie irrégulièrement sous forme des harmoniques (Figure 4.24.) ; sa valeur est maximale entre 2 à 3 [s] et minimale entre 7 à 8 [s]. Cet effet se trouve visible pour tous les résultats de la simulation.

La figure 4.25 montre les courbes de variation de la puissance mécanique et le couple mécanique en fonction du temps. On rappelle que c'est le vent qui fait tourner la turbine, c'est pourquoi, ces courbes varient avec la vitesse du vent. Par conséquent, la puissance mécanique ainsi que le couple atteignent leurs valeurs maximale et minimale respectivement entre 2 à 3 [s] et 7 à 8 [s].

En réalité, pour un fonctionnement moteur, la vitesse de rotation de la machine asynchrone  $\omega_r$  augmente progressivement jusqu'à la vitesse de synchronisme  $\omega_s$  ( $\omega_s=157.1$  [rad/s] pour les machines quadripolaires). L'intervention du couple mécanique a poussé la vitesse de rotation à une valeur supérieure à la vitesse de synchronisme, plus de 160 [rad/s] (voir Figure 4.26). Alors la machine fonctionne en régime générateur. Cependant, la diminution de la vitesse du vent entraîne la diminution du couple mécanique ; cette action a comme conséquence la diminution de la vitesse de rotation, elle s'approche de la vitesse du synchronisme. Si le vent est très faible, elle est inférieure de la vitesse du champ tournant, la machine est à nouveau en régime moteur (entre 7 à 8 [s]).

En outre, le courant statorique, au démarrage, atteint environ six fois du courant nominal. Il diminue brusquement à la fin du régime transitoire à  $t=0.7$  [s], mais son allure varie aussi avec la vitesse du vent pendant le régime permanent (voir Figure 4.27).

Les courbes donnant des informations sur le couple électromagnétique (figure 4.28), la puissance active et réactive de la machine (Figure 4.29) montre que le couple

électromagnétique et la puissance active changent de signe. On peut alors affirmer que la machine fonctionne en générateur : la puissance active est négative, cela veut dire que la machine n'absorbe pas la puissance active mais elle la fournit au réseau en absorbant sa puissance réactive. Malgré cela, quand le vent devient très faible (entre 7 à 8 [s]), le couple mécanique de la turbine diminue considérablement, la machine tend à absorber la puissance active du réseau, on se retrouve dans un fonctionnement moteur.

## CHAPITRE V - IMPLICATION PEDAGOGIQUE

### INTRODUCTION

Comme on l'a déjà mentionné dans l'introduction générale du sujet, cette partie consiste à présenter l'intérêt pédagogique du sujet. C'est en fait une rédaction des cours susceptible d'être pratiqué au niveau de l'enseignement au lycée Technique et Professionnel. Elle doit alors être adaptée au niveau des élèves cibles, pour ce faire chaque thème des cours est tiré des programmes scolaires officiels.

### THEME 1 : MACHINE SYNCHRONE

Matière : Technologie

Secteur : Industriel

Niveau : 3<sup>ème</sup> Année

Spécialité : TMEL

Durée : 6 heures

Pré requis :

- ❖ courant et tension électriques ;
- ❖ Lecture de schéma ;
- ❖ Lois de base de l'électromagnétisme.

Objectifs :

L'objectif de cette séquence pédagogique est donc de :

- ❖ faire connaître les différentes technologies ;
- ❖ distinguer les principaux éléments et les modes de branchements d'une machine synchrone ;

Matériels pédagogiques :

- Tableau noir ;
- Craies de différentes couleurs ;
- Règles, équerre, compas ;
- Polycopiés.

Plan de cours :

- I- Généralités
- II- Constitution d'une machine synchrone
- III- Symboles
- IV- Principe de fonctionnement :
- V- Alimentation des enroulements d'excitation d'une M.S
- VI- F.é.m. induite
- VII- Modes de fonctionnement

### I- Généralités :

Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. Les machines synchrones (MS) sont utilisées principalement pour la production de l'énergie électrique en tant que générateur de courant et de tension alternative.

La gamme de puissance des moteurs synchrones est très étendue, elle va des entraînements de bandes de disques (quelques watts à quelque 10 W) aux entraînements de grande puissance (pompes, propulsion de bateaux, générateurs à vitesse variable, traction... quelque MW à quelque 10 MW) en passant par les servomoteurs de la robotique (bras du robot, broches de machines-outils... : quelque 100 W à quelque 10 kW et même 100 kW).

Une autre utilisation des machines synchrones est la production ou la consommation de l'énergie réactive dans un réseau afin d'améliorer le facteur ( $\cos\varphi$ ) et de permettre le réglage de la tension.

Même si les structures des machines sont très variées, leurs principes de fonctionnement et de pilotage restent voisins.

### II- Constitution d'une machine synchrone :

Comme dans toutes les machines tournantes, on distingue :

- la partie fixe appelée stator, et
- la partie tournante appelée rotor.

Une machine synchrone diffère d'une machine asynchrone des faits suivants :

- Le rotor de la machines synchrone tourne à la même vitesse que le champ tournant quelles que soient la charge et sa nature ;
- La possibilité de régler le  $\cos\varphi$  à une valeur optimale pour le fonctionnement de la machine synchrone.
- La machine synchrone nécessite un inducteur (excitation) constitué généralement par un enroulement alimenté par un courant continu.
- Le rotor d'une machine synchrone peut être non seulement à pôles lisses, mais aussi à pôles saillants, et à aimants permanents.

### III- Symboles :

Voici donc le symbole d'une machine synchrone :

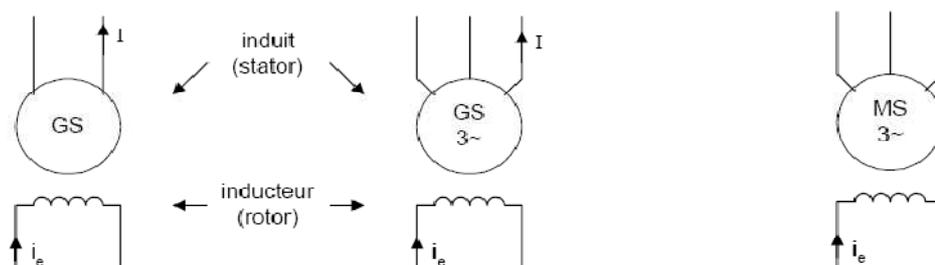


Figure 1. Symbole d'une machine synchrone

IV- Principe de fonctionnement :

Voici d'abord le schéma de principe d'une machine synchrone avant d'entrer à son principe de fonctionnement :

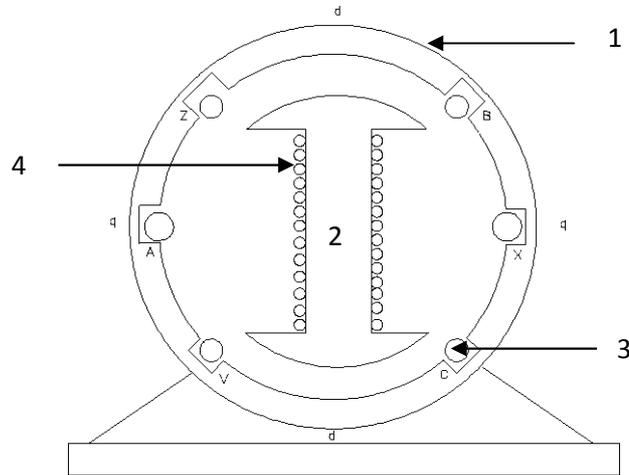


Figure 2. Coupe d'une machine synchrone

Légende : 1 : Stator ; 2 : rotor ; 3 : enroulement d'induit ; 4 : enroulement inducteur.

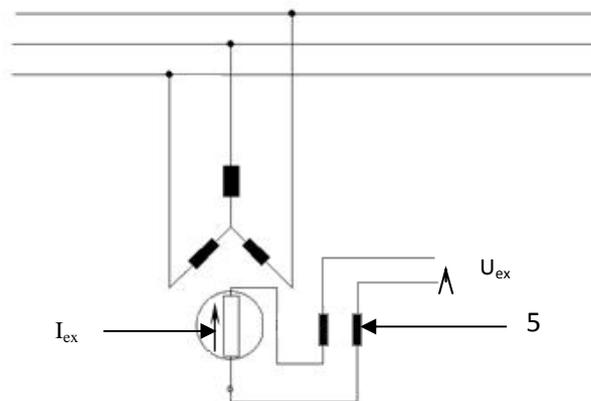


Figure 3. Principe de branchement d'une MS

Légende : 5 : bagues ;  $U_{exc}$  : tension d'excitation ;  $I_{exc}$  : courant d'excitation.

Le stator (1) est identique à celui d'une machine asynchrone (MAS) et contient un enroulement souvent triphasé (3). L'enroulement d'excitation (4) est alimenté par un courant continu à travers les bagues (5). Lorsque le rotor tourne à une certaine vitesse  $n_2$  le flux d'excitation qu'il produit embrasse l'enroulement statorique et induit dans celui-ci une f.é.m. de fréquence :

$$f_1 = \frac{p * n_2}{60}$$

Si l'enroulement statorique est fermé sur une charge, le courant qui le traverserait créerait un champ tournant de vitesse :

$$n_1 = \frac{60 * f_1}{p}$$

Où :

p : est le nombre de paires de pôles.

De ces deux expressions découlent que  $n_1$  est égal à  $n_2$ , c'est-à-dire que le rotor tourne à la même vitesse que le champ tournant, d'où l'appellation de la machine synchrone.

#### V- Alimentation des enroulements d'excitation d'une M.S :

Les machines synchrones peuvent être soit :

- À une excitation indépendante ou ;
- Avec un système d'auto-excitation.

Dans le cas de l'excitation indépendante, on utilise une génératrice à courant continu montée en bout d'arbre de la machine synchrone ou entraînée par une autre machine. Le schéma de principe est la suivante :

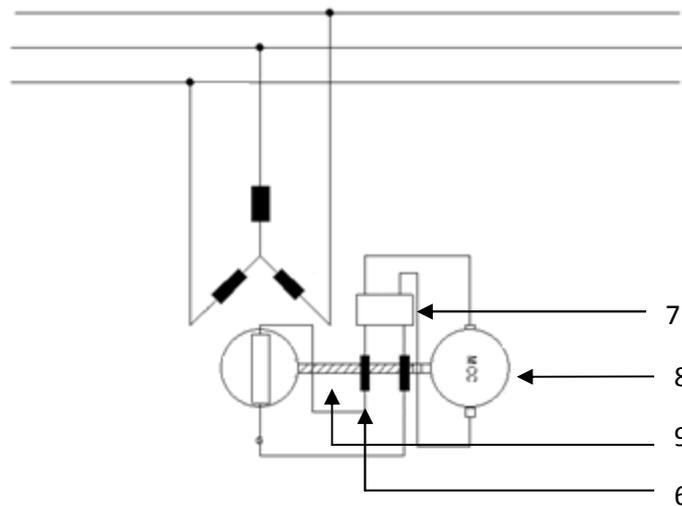


Figure 4.MS à excitation indépendante

Légende : 6 : balais ; 7 : régulateur de tension ; 8 : génératrice à courant continu ; 9 : arbre.

Pour le système d'auto-excitation, l'enroulement inducteur est alimenté à partir de l'enroulement de l'induit à travers des redresseurs (à diodes ou à thyristors). La puissance nécessaire à l'excitation est de l'ordre de 0.3 à 2% de la puissance de la machine.

Le schéma de principe est la suivante :

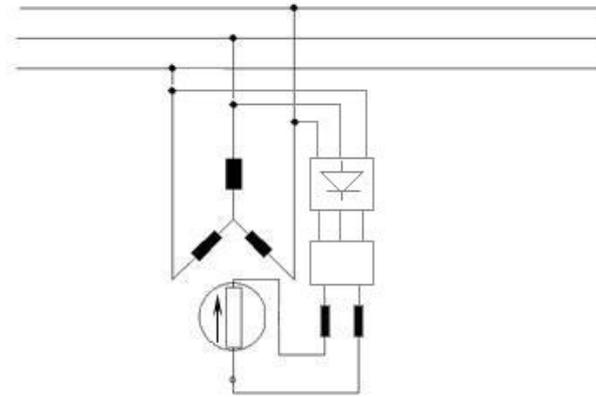


Figure 5.MS avec un système d'auto-excitation

Dans les alternateurs modernes, on utilise un système d'excitation sans contact glissant (bagues) combinant les deux systèmes d'excitation précédents comme illustre la figure suivante :

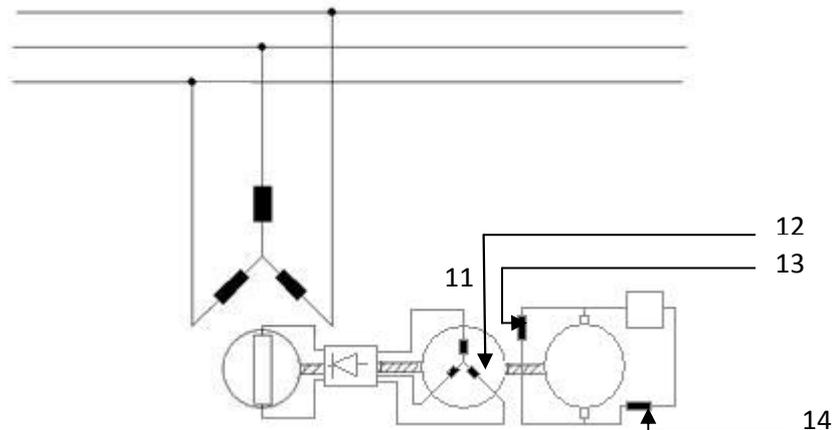


Figure 6.MS avec un système d'excitation sans contact

Légende :

- 11 : rotor de la machine synchrone excitatrice ;
- 12 : Induit de la machine synchrone excitatrice (enroulement) ;
- 13 : enroulement d'excitation de la machine synchrone excitatrice ;
- 14 : enroulement d'excitation de la génératrice à courant continu.

L'absence de contact à balais dans le système d'excitation de l'alternateur permet d'augmenter la fiabilité de ce dernier.

VI- f.é.m. induite :

Un enroulement de l'induit (stator) soumis au champ magnétique tournant de l'entrefer est le siège d'une f.é.m.  $e(t)$  de valeur efficace  $E$ .

$$E = KN\Phi f = KN\Phi p n_s = K' \Phi n_s \text{ finalement : } E = K' \Phi n_s$$

$E$  : f.é.m. induite (V)

$K$  : coefficient de Kapp (caractéristique de la machine)

$N$  : nombre de conducteurs d'une phase de la machine (1 spire = 2 conducteurs)

$F$  : flux maximum à travers un enroulement (Wb)

$f$  : fréquence du courant statorique

$p$  : nombre de paires de pôles

$n_s$  : vitesse de rotation ( $\text{trs.s}^{-1}$ )

$K' = KNp$  : constante globale (caractéristique du moteur)

Remarque :

Les enroulements sont disposés dans le stator de telle façon que la f.é.m.  $e(t)$  soit le plus possible de forme sinusoïdale ; en triphasé le stator comporte trois enroulements ou phases. On obtient trois f.é.m.  $e_1(t)$ ,  $e_2(t)$  et  $e_3(t)$  de même valeur efficace  $E$  et déphasées de  $2\pi/3$ .

VII- Modes de fonctionnement :

La machine synchrone est réversible.

a) Fonctionnement en moteur :

Le champ tournant du stator « accroche » le champ lié au rotor à la vitesse  $\Omega_s = \omega/p$ .

b) Fonctionnement en alternateur (génératrice) :

Le rotor et son champ sont entraînés par une turbine. Les bobines de l'induit sont alors le siège de f.é.m. alternative de pulsation  $\omega = p.\Omega_s$ .

**Rappel** : toute variation de champs magnétique à travers une bobine crée aux bornes de la bobine une f.é.m. induite.

**THEME 2 : BILAN DES PUISSANCES**

Niveau : 3<sup>ème</sup> année

Secteur : Industriel

Spécialité : TMEL

Matière : Électrotechnique

Durée : 4 h

Objectifs :

L'objectif de cette séquence pédagogique est donc de :

- ❖ Savoir calculer les différentes puissances et pertes,
- ❖ Savoir calculer le rendement d'une machine synchrone.

Pré-requis :

- Notion de force et couple moteur ;
- Différences entre les puissance (utilisées) et pertes (énergies)
- Phénomènes d'hystérésis magnétique et courant de Foucault, etc.

Matériels pédagogiques :

- Tableau noir ;
- Craies de différentes couleurs ;
- Règles, équerre, compas ;
- Polycopiés.

Plan de cours :

- I- Bilan des puissances d'un alternateur :
  - a. Puissance utile :
  - b. Bilan des pertes :

I. Bilan des puissances d'un alternateur :

La figure ci-dessous illustre les différentes puissances et les pertes de puissances dans une machine synchrone.

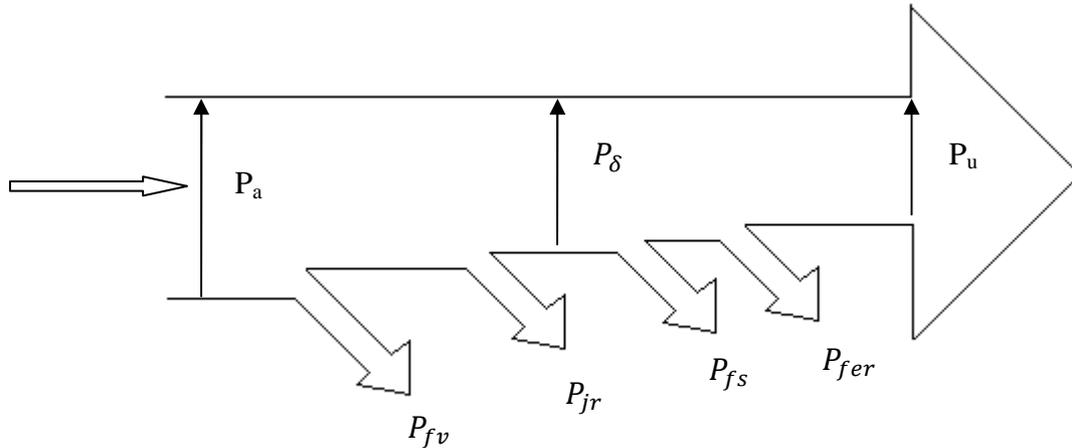


Figure.6 Bilan des puissances d'une MS

Légende :

- $P_{méc}$  ou  $P_a$  est la puissance mécanique ou bien la puissance absorbée ;
- $P_{\delta}$  est la puissance électromagnétique (c'est-à-dire la puissance transmise) ;
- $P_{élec}$  ou  $P_u$  est la puissance électrique utile ou tout simplement la puissance utile ;
- $P_{fv}$  est la perte due au frottement de ventilation ;
- $P_{jr}$  est la perte joule dans l'inducteur ;
- $P_{fs}$  est la perte joule dans l'induit ;
- $P_{fer}$  est la perte fer.

a. Puissance utile :

- En monophasé, cette puissance est donnée par la formule suivante :

$$P_U = U \cdot I \cdot \cos\varphi \text{ [W]}$$

- En triphasé, elle est donnée par :

$$P_U = U \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \cos\varphi \text{ [W]}$$

Où :

- $U$  est la tension entre deux phases ;
- $I$  est l'intensité du courant en ligne ;
- $\cos\varphi$  est le facteur de puissance.

b. Bilan des pertes :

Les pertes dans une MS peuvent être classées en deux catégories :

- Les pertes principales ;
- Les pertes supplémentaires.

• **Pertes joule dans l'enroulement de l'induit :**

En monophasé elles sont données par la formule suivante :

$$P_{ji} = RI^2 \quad [\text{W}]$$

En triphasé, on a :

Pour le couplage en étoile : si R est la résistance d'un enroulement d'induit :

$$P_{ji} = 3RI^2 \quad [\text{W}]$$

Pour le couplage en triangle :

$$P_{ji} = RJ^2 \quad [\text{W}]$$

$$\text{Avec : } J = \frac{I}{\sqrt{3}} \quad [\text{A}]$$

Si r est la résistance mesurée entre deux bornes de phase, les pertes joule est de :

$$P_{ji} = \frac{3}{2}rI^2 \quad [\text{W}]$$

• **Pertes par effet joule dans l'inducteur :**

Si U' est la tension (continue) d'excitation et I<sub>ex</sub> est l'intensité du courant, la puissance fournie à l'inducteur est de :

$$P_{jr} = U' \cdot I_{ex} \quad [\text{W}]$$

Pour une excitation indépendante l'expression des pertes est de :

$$P_{jr} = I_{ex}^2 \cdot R_{ex} + \Delta U_b \cdot I_{ex} \quad [\text{W}]$$

Où : R<sub>ex</sub> est la résistance de l'enroulement d'excitation à la température de service ;

$$\Delta U_b = 2 \text{ [V]}, \text{ est la chute de tension aux bornes des contacts aux balais.}$$

Pour une excitation montée en bout de l'arbre du générateur :

$$P_{jr} = (I_{ex}^2 \cdot R_{ex} + \Delta U_b \cdot I_{ex}) \eta_{ex} \quad [\text{W}]$$

Avec  $\eta_{ex} = 0.80$  à  $0.85$ , est le rendement d'excitation.

- **Pertes magnétiques :**

Les pertes magnétiques sont données par la formule :

$$P_M = P_H + P_{CF} \text{ [W]}$$

Où :  $P_H$  est la perte par hystérésis magnétique ;

$P_{CF}$  est la perte due aux courants de Foucault.

- **Pertes mécaniques :**

Les pertes mécaniques sont constituées par les frottements dans les roulements (ou les parties mobiles) et les pertes dues à la ventilation. Elles sont données par la formule suivante :

$$P_{méc} = 3.68p \left(\frac{V_2}{40}\right)^3 \cdot \sqrt[3]{10^3 \cdot l_1} \text{ [W]}$$

$$\text{Avec } V_2 = \frac{\pi(D_1 - 2\delta)}{60} \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$$

Où :  $V_2$  est la vitesse linéaire à la surface des pôles du rotor ;

$l_1$  est le périmètre moyen de l'induit ;

$D_1$  est le diamètre de l'alésage de l'induit.

- **Somme des pertes :**

$$\sum P = P_{ji} + P_{jr} + P_M + P_{méc} + P_{sv} + P_{Sch} \text{ [W]}$$

Où :  $P_{sv}$  est la perte supplémentaire à vide et  $P_{Sch}$  est la perte supplémentaire en charge :

$$P_{Sch} = 0.5\%P_n \text{ pour } P_n < 1000 \text{ [KW]}$$

$$P_{Sch} = 0.25 \text{ à } 0.4\%P_n \text{ pour } P_n > 1000 \text{ [KW]}$$

- **Rendement de la machine synchrone :**

$$\eta = 1 - \frac{\sum P}{P_U + \sum P} = \frac{P_U}{P_a} * 100 \text{ [%]}$$

$P_a$  est la puissance absorbée par la machine.

**THEME 3 : EXERCICE**

Niveau : 3<sup>ème</sup> année

Spécialité : TMEL

Secteur : Industriel

Matière : Électrotechnique

Durée : 2 h

Objectifs :

Cet exercice à pour but d'évaluer la compréhension des élèves concernant la machine synchrone.

Pré-requis :

- Machine synchrone
- Calcul des paramètres de cette machine.

Matériels pédagogiques :

- Tableau noir ;
- Craies de différents couleurs ;
- Règles, équerre, compas.

**Sujet :**

Un alternateur triphasé en étoile tourne à la vitesse de 750 tr/mn, débite un courant de 350 A et fournit entre deux phases une tension efficace  $U = 400V$ , de fréquence 50Hz et de facteur de puissance de 0.9. La résistance mesurée entre deux bornes de phase de stator est  $r = 0.03\Omega$  et l'ensemble des pertes collectives et par effet joule au stator est  $P = 6KW$ .

Les essais ont donné :

$I_{ex}$ [A]	2	6	8	10	14	20	27
$E_0$ [V]	60	220	270	320	384	434	460

Tableau : f.é.m. en fonction de  $I_{ex}$

Où  $I_{ex}$  : courant d'excitation ;

$E_0$  f.é.m. mesurée entre deux phases.

Travaux demandés :

- 1) Tracer la caractéristique à vide de l'alternateur ;
- 2) Calculer la puissance utile de l'alternateur et son rendement ;
- 3) Le nombre des conducteurs par enroulement de l'induit est de 72 et le flux maximal sous un pôle vaut  $\Phi = 30[mWb]$ .  
Calculer le nombre de pôles de l'alternateur.

**Solution :**

1)- Traçage de la caractéristique à vide de l'alternateur :

Courant : 1cm  $\longrightarrow$  2A

Tension : 1cm  $\longrightarrow$  40V

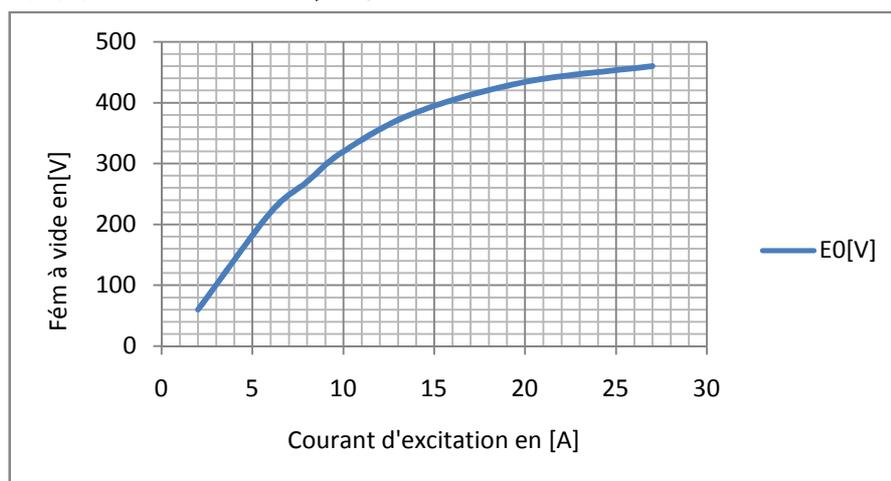


Fig.7 f.é.m. en fonction de  $I_{ex}$

2)- La puissance utile de l'alternateur :

$$P_U = U.I.\sqrt{3}.\cos\varphi \text{ [W]}$$

A.N:

$$P_U = 400 * 350 * \sqrt{3} * 0.9 = 214.2[\text{KW}]$$

- Son rendement :

Pour pouvoir calculer son rendement, il faut d'abord chercher les pertes par effet joule au stator :

$$P_{ji} = \frac{3}{2} r I^2 \text{ [W]}$$

A.N:

$$P_{ji} = \frac{3}{2} * 0.03 * (350)^2 = 5.512[\text{KW}]$$

$$\text{Et } P_a = P_U + (P_S + P_{jr}) + P_{js} \text{ [W]}$$

A.N:

$$P_a = 214.2 + 6 + 5.512 = 225.71 \text{ [KW]}$$

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma P}{P_U + \Sigma P} = \frac{P_U}{P_a} * 100 \text{ [%]}$$

$$\eta = \frac{214.2}{225.71} = 95\%$$

3)-Le nombre de pôles :

$$p = \frac{f}{n}$$

A.N

$$p = \frac{50}{12.5} = 4$$

## CONCLUSION GENERALE

A terme de ce travail, nous pouvons conclure que, premièrement, l'exploitation de l'énergie éolienne est particulièrement compatible avec les préoccupations liées au développement durable, puisqu'elle représente une source d'énergie renouvelable dont la production ne génère absolument aucun gaz à effet de serre (GES).

Deuxièmement, la production d'énergie électrique par une centrale autonome n'est pas pour le moment une alternative dans notre cas (UNA) vue la taille de l'installation qui est considérée comme une installation industrielle, cela est lié à l'investissement de l'installation qui est complexe et trop coûteux surtout au niveau du stockage de l'énergie et au niveau des convertisseurs ; par contre, si on injecte l'énergie du réseau vers notre installation, c'est-à-dire supprimer la quasi-totalité des batteries et convertisseurs et faire un système hybride, c'est-à-dire centrale thermique et centrale éolienne cela nous fera gagner beaucoup du point de vue technique, c'est-à-dire une stabilité du système en cas d'absence du vent mais aussi en terme économique cela nous fera gagner 8.127.655.625 Ar de bénéfice, ce qui fait que la meilleure solution pour notre cas c'est d'opter pour un système hybride.

Troisièmement, les résultats de la simulation montrent la dépendance de ce système de production aux données météorologiques (vitesse du vent, température, hygrométrie,..). Cela entraîne la perturbation de la production, on peut même avoir un arrêt de production pour certains temps (temps moins venteux, cyclone,..). Le couplage au réseau résout alors l'arrêt de production chez les utilisateurs et diminue la production de l'énergie d'origine artificielle polluante.

Et enfin, les fiches pédagogiques données dans la dernière partie de ce travail apportent une grande aide à tout enseignant qui va préparer un cours concernant la machine synchrone.

Ainsi se termine ce rapport, et c'est dans l'intention de vous remercier que nous avons l'occasion de vous rendre connaissance toute notre gratitude d'avoir pris la peine de tourner ces humbles pages.

# ANNEXES

**A. Les caractéristiques techniques du GEV MP 275 kW :**

a) Concept de l'éolienne :

• Rotor bipale aval, machine bi-vitesse			
• Moyeu oscillant avec amortisseur élastique			
• Régulation pitch à commande hydraulique			
• Vitesse de vent de démarrage - m/s .....	3,5		
• Vitesse de vent de coupure - m/s .....	20		
• Tension et fréquence délivrées .....	400 V triphasé - 50 Hz ou 60 Hz		
• Classe IEC 61400-1	III	II	I
• Hauteur du moyeu - m .....	55/60	55/60	55/60
• Diamètre du rotor - m .....	32	30	28
• Vitesse de rotation - rpm (50Hz) .....	De 31 à 46	De 31 à 46	De 31 à 46
• Vitesse de vent maximum - m/s			
• Configuration de marche .....	de 42,5 à 59,5	de 42,5 à 59,5	de 42,5 à 59,5
• Position de protection .....	85	85	85

b) Protection contre les conditions extrêmes :

- Corrosion ..... Mât : peinture marine Classe C5
- Étanchéité et isolation thermique du rotor ..... IP55 / Classe F
- Résistance cyclonique ..... Système d'abaissement
- Résistance sismique ..... Architecture flexible (mât haubané)  
..... Ancrages multiples absorbants
- Protection contre la foudre ..... Mise à la terre de l'intégralité du système (IEC-61400-24)  
..... Parafoudres nacelle (IEC 62305/61643-12)
- Températures limites de fonctionnement ..... De -10°C à +50°C

c) Détails techniques :

- Multiplicateur ..... 2 étages - planétaire
- Générateur ..... Asynchrone à cage d'écureuil, 2 vitesses, puissance nominale 275 kW
- Couplage réseau ..... Compensation automatique du cos ( $\varphi$ ), coffret de couplage et transformateur en pied de mât
- Frein d'urgence et de parking ..... Aérodynamique et disque sur arbre rapide
- Orientation ..... Active hydraulique, dévrillage automatique des câbles

d) Mât :

- Type ..... Haubané : tubulaire ou treillis
- Sections ..... 5 sections de 11,88 m
- Matériau ..... Acier galvanisé
- Installation ..... Installation autonome par treuil hydraulique
- Ancrages ..... Micropieux en acier dans forage de béton coulé (Volume suivant l'étude de sol (env. 15 m3))

e) Pales :

- Matériau ..... Composite vinylester renforcé fibre de verre

f) Système de contrôle commande :

- Automates de contrôle ..... Automate industriel Siemens par protocole Profibus
- Alimentation de secours ..... 56 Ah
- Supervision à distance ..... V-SCADATM, via RTC, radio, internet...

g) Poids – dimensions (classe III) :

- Nacelle avec rotor ..... 7 800 kg
- Ensemble avec mât ..... 20 000 kg
- Volume total ..... 5 équivalents 40'' + pales (1 fardeau)

**B. Paramètres de la machine asynchrone :**

Voici les différents paramètres de la machine utilisée dans la simulation :

Tableau B.1.paramètre d'une machine asynchrone triphasée

<b>Paramètres</b>	<b>Valeur</b>
Puissance nominale	4[kW]
Vitesse nominale	1430 [tr/min]
Tension nominale	380 [V]
Courant nominal	8.5 [A]
Nombre de paires de pôles	2
Resistance statorique	1 [Ω]
Resistance rotorique	0.2 [Ω]
Inductance statorique	163 [mH]
Inductance rotorique	24[mH]
Inductance mutuelle	60 [mH]
Moment d'inertie	50.10 <sup>-3</sup> [kg/m <sup>2</sup> ]
Facteur de puissance	0.66
Fréquence	50 [Hz]
Rendement	80%

**C. Données météorologiques d'Antsiranana :**

Tableau C.1. Données météorologiques d'Antsiranana

				Unité	Lieu des données climatiques			
Latitude				°N	12.3			
Longitude				°E	49.3			
Elevation				m	0			
Température extérieur de calcul de chauffage				°C	22.30			
Température extérieur de calcul de climatisation				°C	32.26			
Amplitude des températures du sol				°C	2.01			
Month	Air temperature	Relative humidity	Daily solar radiation horizontal	Atmospheric pressure	Wind speed	Earth temperature	Heating degree-days	Cooling degree-days
	°C	%	kWh/m <sup>2</sup> /d	kPa	m/s	°C	°C-d	°C-d
January	24.5	64.1%	5.97	100.6	6.0	25.7	0	452
February	24.5	67.0%	6.62	100.5	5.3	25.9	0	412
March	25.7	70.3%	7.34	100.3	4.6	26.9	0	489
April	27.2	71.8%	7.55	100.1	4.0	28.4	0	517
May	28.8	70.3%	7.31	99.8	4.2	29.7	0	585
June	30.8	63.3%	6.82	99.5	8.4	29.3	0	623
July	31.2	60.7%	6.73	99.4	10.5	28.5	0	655
August	30.9	62.2%	6.90	99.5	10.0	28.2	0	646
September	28.9	70.3%	7.09	99.8	5.9	28.8	0	567
October	26.5	71.8%	6.91	100.2	4.0	28.2	0	512
November	26.2	65.1%	6.17	100.5	4.8	27.3	0	489
December	25.3	64.7%	5.74	100.6	5.8	26.4	0	476
<b>Annual</b>	27.5	66.8%	6.76	100.1	6.1	27.8	0	6423
Measured at (m)					10.0	0.0		

Document generated on Fri Oct 22 05:23:58 EDT 2010

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Frédéric POITIERS, " Etude et commande de génératrice synchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne", Thèse de Doctorat à l'Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, 19 decembre2003 ;
- [2] Salma El Aimani, "Modélisation de différentes technologies d'éolien intégrées dans un réseau de moyenne tension", Thèse de Doctorat de l'Ecole centrale de Lille ;
- [3] H. Ben Ahmed, " Généralité sur l'énergie éolienne et convertisseurs associés. Exemple du site de Ker Lann", Travaux issus de l'équipe de Ker Lann du laboratoire SATIE (B. Multon, O.Gergaud, N. Bernard, G. Robin, H. Ben Ahmed) ;
- [4] Bernard MULTON, "Aérogénérateurs électriques", Master Recherche STS IST-SPEE Paris 11-ENS Cachan 2009, module K 16 ;
- [5] Adam MIRECKI, " Etude comparative des chaines de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance", Thèse de Doctorat à l'INSTITUT POLYTECHNIQUE de TOULOUSE, 5 avril 2005, Les éoliennes ; [6] Cellule Cadre de Vie de l'Union des Villes et Communes de Wallonie : « Les éoliennes : Aspects techniques et environnementaux ». Présenté par Christel Termol ;
- [7] SAÏD M'zè, "Cours d'Electrotechnique 3è et 4è année, Cours de production de l'énergie électrique 4è année", Ecole Normale Supérieure pour L'Enseignement Technique, Génie Electrique, années 2008 et 2009 ;
- [8] Ch.B. Andrianirina, Cours d'électronique de puissance IP.Barrade, ESP Antsiranana, année 2008 ;
- [9] Détermination du courant d'emploi d'une installation électrique, Cours de Technologie Terminale FTG, année 2006 ;
- [10] Les systèmes éoliennes autonomes (guide de l'acheteur), année 2000 ;
- [11] Données météorologiques du service inter-régional nord de la météorologie et de l'hydrologie (Antsiranana).

## WEBOGRAPHIE

- [12] [www.retscreen.net](http://www.retscreen.net)
- [13] [www.mada-energy.com](http://www.mada-energy.com)
- [14] [www.windenergy.com](http://www.windenergy.com)
- [15] [www.vergnet.fr](http://www.vergnet.fr)
- [16] [www.bioshop.fr](http://www.bioshop.fr)

## Table des matières

<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	1
<b>CHAPITRE I - GENERALITE SUR LA PRODUCTION EOLIENNE</b> .....	8
1-1-Généralité:.....	8
1-1-1.Historique de l'énergie éolienne : .....	8
1-1-2.Développement de l'énergie éolienne : .....	8
1-1-3.Taille des aérogénérateurs : .....	9
1-2-Conversion de l'énergie éolienne : .....	10
1-2-1.Descriptif d'une éolienne : .....	10
1-2-2.Principe de fonctionnement d'une éolienne : .....	12
1-2-3.Type d'aérogénérateurs : .....	12
1-2-4.Différents types d'éolienne : .....	14
1-2-5.Théorie d'éolienne : .....	17
1-2-6.Puissance fournie par une éolienne : .....	18
1-2-7.Régulation de la puissance : .....	19
1-2-8.Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne : .....	19
1-2-9.Implantation sur un site : .....	20
<b>CHAPITRE II - CONTEXTE D'UN PROJET DE CENTRALE EOLIENNE A L'UNA</b> .....	28
2-1-Analyse technique : .....	28
2-1-1.Caractéristiques du vent : .....	28
2-1-2.Origine du vent : .....	30
2-2-Données climatiques : .....	36
2-2-1.Analyse de la distribution du vent à l'UNA : .....	36
2-2-2.Variation pluriannuelle de la vitesse du vent : .....	38
2-2-3.Évaluation du potentiel éolien : .....	38
2-3-Structure de l'installation de l'UNA : .....	39
2.3.1-Étude et Analyse de chaque bâtiment : .....	40
<b>CHAPITRE III – ÉVALUATION DU COUT D'INSTALLATION</b> .....	59
3-1-Généralité : .....	59
3-2-Coût de la machine et de ses accessoires (CPM) : .....	59
3-3-Coût d'étude de faisabilité (CEF) : .....	60
3-4-Coût d'installation (CI) ou Coût de construction (CC) : .....	60
3-5-Coût d'investissement total (CIT) : .....	60

3-6-Calcul des prix totaux de l'installation : .....	61
3-7-Choix du lieu d'implantation : .....	62
3-8-Aspects techniques et environnementaux des éoliennes : .....	63
<b>CHAPITRE IV - MODELISATION ET SIMULATION DU SYSTEME DE PRODUCTION.....</b>	<b>65</b>
4.1Modèle du système de production éolien : .....	65
4.1.1Modélisation de la turbine : .....	65
4.1.2Modélisation de la machine asynchrone : .....	66
4.2Simulation et analyse des systèmes de production : .....	74
4.2.1Simulation du vent : .....	74
4.2.2Simulation du système éolien : .....	75
4.2.2.1Simulation de la turbine : .....	75
4.2.2.2Simulation de la machine asynchrone : .....	77
4.2.3Simulation de l'ensemble du système : .....	82
4.2.3.1Schéma bloc du système : .....	82
4.2.3.2Résultats de la simulation du système : .....	84
4.2.3.3Interprétation des résultats : .....	86
<b>CHAPITRE V - IMPLICATION PEDAGOGIQUE.....</b>	<b>88</b>
<b>THEME 1 : MACHINE SYNCHRONE.....</b>	<b>88</b>
I-Généralités : .....	89
II-Constitution d'une machine synchrone : .....	89
III-Symboles : .....	89
IV-Principe de fonctionnement : .....	90
V-Alimentation des enroulements d'excitation d'une M.S : .....	91
VI- f.é.m. induite : .....	93
VII-Modes de fonctionnement : .....	93
<b>THEME 2 : BILAN DES PUISSANCES.....</b>	<b>94</b>
<b>THEME 3 : EXERCICE.....</b>	<b>98</b>
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>101</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>102</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>106</b>
<b>WEBOGRAPHIE .....</b>	<b>106</b>

## LISTE DES FIGURES :

Figure1. 1.Evolution de puissances éoliennes installées dans le monde en MW .....	9
Figure1. 2.Taille des hélices en m et puissances en KW .....	9
Figure1. 3.Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.....	10
Figure1. 4.Éléments constitutifs d'une éolienne .....	10
Figure1. 5.Vue éclatée d'une éolienne .....	11
Figure1. 6.Rotor de Savonius .....	13
Figure1. 7.Type de rotor de Darrieus .....	13
Figure1. 8.Eolienne '' amont '' .....	13
Figure1. 9.Eolienne ''aval '' .....	13
Figure1. 10.Système éolien utilisant la génératrice asynchrone à cage.....	15
Figure1. 11.Système éolien basé sur la génératrice asynchrone à cage à fréquence variable .....	15
Figure1. 12.Système éolien à génératrice asynchrone à rotor bobiné .....	16
Figure1. 13.Système éolien basé sur la génératrice synchrone à aimants permanents.....	16
Figure1. 14.Système éolien utilisant la génératrice synchrone et un redresseur à diodes .....	16
Figure1. 15.Système de production en général en petite puissance .....	17
Figure1. 16.Caractéristique puissance-vitesse d'une éolienne .....	19
Figure1. 17.La densité de puissance en fonction du lieu d'implantation .....	21
Figure1. 18.Exemple de mât de mesure .....	21
Figure1. 21.Abaque de choix du nombre de pales .....	24
Figure1. 19.Pylône en treillis .....	24
Figure1. 20.Pylône haubané .....	24
Figure1. 22.Composants d'un système éolien.....	27
Figure2. 1.Vue schématique de la couche atmosphérique standard .....	28
Figure2. 2.Courbe de variation de la température .....	37
Figure2. 3.Courbe de variation de l'hygrométrie .....	37
Figure2. 4.Courbe de variation de la vitesse du vent.....	37
Figure2. 5.Moyenne mensuelle des vitesses du vent sur 10 ans.....	38
Figure2. 6. Schéma de distribution électrique de l'UNA .....	39
Figure2. 7.Schéma d'un appartement d'un bloc des étudiants .....	41
Figure2. 8.Schéma d'un appartement P.V des étudiants .....	44
Figure2. 9. Schéma d'un appartement P.J des étudiants .....	46
Figure2. 10.Schéma d'un appartement R+3(belle rose) des étudiants (rez-de-chaussée) .....	48
Figure2. 11.Schéma d'un appartement R+3(belle rose) des étudiants (1er étage et plus).....	48
Figure2. 12.répartition mondiale des parts de marché par fabricant de turbines éoliennes (production et installation).....	51
Figure2. 13.Courbe d'énergie fournie par l'aérogénérateur .....	56
Figure2. 14.Courbe de puissance de l'aérogénérateur.....	56
Figure2. 15.Courbe de densité de probabilité de Weibull .....	56
Figure2. 16.Système de production au complet .....	57
Figure3. 1.Répartition des coûts d'un projet éolien.....	59
Figure3. 2.Plan d'installation de la centrale éolienne de l'UNA.....	62
Figure4. 1.Système éolien utilisant la génératrice asynchrone à cage.....	65
Figure4. 2.Coefficient de puissance en fonction de $\lambda$ .....	66

Figure4. 3.Caractéristiques couple-vitesse d'une machine asynchrone .....	67
Figure4. 4.Schéma équivalent simplifié de la machine asynchrone.....	67
Figure4. 5.Courbe d'évolution de la vitesse du vent dans le temps. ....	74
Figure4. 6.Modèle de la turbine sous simulink .....	75
Figure4. 7.Schéma bloc de la turbine .....	75
Figure4. 8.Puissance et couple mécanique de la turbine (pour $\omega= 3[\text{rad/s}]$ ).....	76
Figure4. 9.Puissance et couple mécanique de la turbine (pour $\omega= 6[\text{rad/s}]$ ).....	76
Figure4. 10.Schéma de la machine asynchrone sous Simulink.....	77
Figure4. 11.Schéma bloc de la source triphasée.....	77
Figure4. 12.Blocs de transformation de Park .....	78
Figure4. 13.Schéma de simulation de la machine asynchrone.....	78
Figure4. 14.Paramètres de la machine asynchrone .....	79
Figure4. 15.Couple électromagnétique en fonction du temps .....	79
Figure4. 16.Courant statorique en fonction du temps .....	80
Figure4. 17.Vitesse du rotor en fonction du temps .....	80
Figure4. 18.Couple électromagnétique en fonction de la vitesse rotorique .....	81
Figure4. 19.Puissances active et réactive en fonction du temps.....	81
Figure4. 20.Vue agrandie de la figure 4.18 à $t = 0.6[\text{s}]$ .....	82
Figure4. 21.Bloc de l'aérogénérateur .....	83
Figure4. 22.Schéma de la machine asynchrone avec modification.....	83
Figure4. 23.Schéma des systèmes de production éolienne.....	84
Figure4. 24.Courbe de variation de la vitesse du vent.....	84
Figure4. 26.Vitesse de rotation de la génératrice en fonction du temps.....	85
Figure4. 25.Puissance et couple mécaniques de la turbine.....	84
Figure4. 27.Courant statorique en fonction du temps .....	85
Figure4. 28.Couple électromagnétique en fonction du temps .....	85
Figure4. 29.Puissances active et réactive en fonction du temps.....	86

### LISTE DES TABLEAUX :

Tableau1. 1.Effet du vent en fonction de sa vitesse .....	22
Tableau1. 2.Valeurs prises par les différents terrains en quatre familles .....	23
Tableau1. 3.Performance typique en fonction de la batterie .....	25
Tableau2. 1.Composition de l'air sec .....	29
Tableau2. 2.Donnée climatique d'Antsiranana année 2009(Source: NASA Surface meteorology and Solar Energy: RETScreen Data).....	36
Tableau2. 3.Vitesse moyenne du vent, facteur d'échelle et facteur de forme en fonction de l'altitude	38
Tableau2. 4.Courant d'emploi du circuit d'éclairage d'un bloc.....	43
Tableau2. 5.Courant d'emploi du circuit de prise de courant d'un bloc .....	43
Tableau2. 6.Courant d'emploi corrigé pour un bloc .....	44
Tableau2. 8.Courant d'emploi du circuit de prise de courant d'un bâtiment P.V .....	45
Tableau2. 9.Courant d'emploi corrigé d'un bâtiment P.V .....	45
Tableau2. 7.Courant d'emploi du circuit d'éclairage d'un bâtiment P.V.....	45
Tableau2. 10.Courant d'emploi du circuit d'éclairage d'un bâtiment P.J .....	46
Tableau2. 11.Courant d'emploi du circuit de prise de courant d'un bâtiment P.J .....	47
Tableau2. 12.Courant d'emploi corrigé d'un bâtiment P.J.....	47
Tableau2. 13.Courant d'emploi du circuit d'éclairage du bâtiment R+3(belle rose) .....	49
Tableau2. 14.Courant d'emploi du circuit de prise de courant du bâtiment R+3(belle rose).....	49

Tableau2. 15.Courant d'emploi corrigé du bâtiment R+3(belle rose).....	50
Tableau2. 16.Résultats de calculs à la hauteur de 60 m sur le site de l'UNA .....	55
Tableau2. 17.Bilan des matériels et équipements nécessaires à l'installation.....	58
Tableau3. 1.Coût et prix de revient pour chaque investissement .....	61
Tableau3. 2.Coût et prix totaux de l'installation .....	61