

SOMMAIRE

| | |
|---|------------------|
| REMERCIEMENTS..... | 3 |
| SOMMAIRE..... | 4 |
| LISTE DES ABREVIATIONS..... | 6 |
| LISTE DES FIGURES..... | 7 |
| LISTE DES TABLEAUX..... | 8 |
| LISTE DES SYMBOLES ET UNITES..... | 9 |
| INTRODUCTION..... | 9 |
| <u>Chapitre I. CONTEXTE ENERGETIQUE DU MONDE RURAL A MADAGASCAR.....</u> | <u>11</u> |
| 1.1 Historique de l'électrification à Madagascar [1]..... | 11 |
| 1.2 Situation de l'électricité à Madagascar [1]..... | 11 |
| 1.3 Politique de l'électrification rurale à Madagascar [1]..... | 12 |
| 1.3.1 FNE | 12 |
| 1.3.2 ORE | 12 |
| 1.3.3 ADER | 13 |
| 1.4 Difficulté de l'électrification en milieu rural..... | 13 |
| <u>Chapitre II. GENERALITE SUR L'ENERGIE ELECTRIQUE D'ORIGINE EOLIENNE.....</u> | <u>14</u> |
| 2.1 Introductions..... | 14 |
| 2.2 Principes et présentations des différents types de capteur éolien..... | 14 |
| 2.2.1 Les capteurs à axe horizontal..... | 16 |
| 2.2.2 Les capteurs à axe vertical..... | 18 |
| 2.3 Les éléments constituants d'une éolienne à axe horizontal..... | 19 |
| 2.3.1 Le tour ou le mat | 20 |
| 2.3.2 Système d'orientation..... | 20 |
| 2.3.3 Le rotor | 20 |
| 2.3.4 Le système de protection et de régulation | 20 |
| 2.3.5 Les multiplicateurs..... | 20 |
| 2.4 Les différentes technologies..... | 21 |
| 3.1 Forme générale de la consommation énergétique d'un village [4]..... | 24 |
| 3.1.1 Evaluation des besoins énergétiques d'un abonné « i »..... | 24 |
| 3.1.2 Consommation énergétique journalière d'un village..... | 25 |
| 3.1.3 Evaluation de la charge pour le cas d'un village à Tsiroanomandidy | 26 |
| 3.2 Calcul de l'énergie consommée du village..... | 27 |
| 3.2.1 Evaluation de la consommation totale journalière | 27 |
| 3.2.1.1 Energie moyenne consommée en première année du village | 28 |
| 3.2.1.2 Evaluation de la puissance | 28 |
| 3.3 Evaluation de la puissance demandée par le village | 30 |
| 3.3.1 Le profil des charges..... | 31 |
| 3.3.2 La durée de fonctionnement de la puissance maximale..... | 32 |
| 3.3.3 La puissance nominale de la microcentrale..... | 32 |
| <u>Chapitre IV. DIMENSIONNEMENT DES ELEMENTS DE LA CHAINE DE CONVERSION DE L'ENERGIE EOLIENNE.....</u> | <u>34</u> |
| 4.1 Partie théorique..... | 34 |
| 4.1.1 L'aérodynamisme [4] [13]..... | 34 |
| 4.1.2 Grandeur caractéristiques : [7]..... | 35 |
| 4.1.2.1 Le rendement η | 35 |
| 4.1.2.2 Le coefficient de puissance C_p [4]..... | 36 |
| 4.2 Partie éolienne | 36 |

| | |
|---|----|
| <u>4.2.1 Variation de la vitesse du vent V [4] ; [10].....</u> | 36 |
| <u>4.2.2 Le diamètre de l'éolienne [7].....</u> | 37 |
| <u>4.2.3 La vitesse spécifique relative « λ ».....</u> | 37 |
| <u>4.2.4 La vitesse de rotation.....</u> | 38 |
| <u>4.3 Organe de transformation</u> | 38 |
| <u> 4.3.1 Le générateur électrique [8].....</u> | 38 |
| <u> 4.3.2 La batterie de stockage [8].....</u> | 39 |
| <u> 4.3.3 L'onduleur convertisseur [8].....</u> | 41 |
| | 42 |
| <u>5.1 Prix et coût d'exploitation</u> | 42 |
| <u>5.2 Définition [9].....</u> | 42 |
| <u>6.1 Introduction</u> | 45 |
| <u>6.2 Effets de l'éolienne sur l'environnement [11].....</u> | 45 |
| <u>6.3 Niveau sonore des éoliennes [12].....</u> | 46 |
| <u>6.4 Quelques mesures à prendre avant l'installation de l'éolienne.....</u> | 46 |
| <u>CONCLUSION.....</u> | 48 |
| <u>BIBLIOGRAPHIE ET WEBOGRAPHIE.....</u> | 58 |

LISTE DES ABREVIATIONS

S.E.C.T.M : Société civil d'Etudes de Concessions et de Travaux de Madagascar.

E.E.M : Electricité et Eau de Madagascar.

S.M.E.E : Société Malgache de l'Electricité et de l'Eau.

JIRAMA : Jiro sy RAno Malagasy.

F.N.E : Fonds National de l'Electricité.

O.R.E : Office pour la Régulation de l'Electricité.

A.D.E.R : Agence pour le Développement de l'Electrification Rurale.

C.S.B : Centre de Santé de Base.

C.F : Cash Flow.

V.A.N : Valeur Actuelle Nette.

I.P : Indice de Profitabilité.

O.M.E.R.T : Office Malgache pour l'Etudes de la Régulation de la Télécommunication.

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|-------------|
| <i>Figure I.1 : Source de l'électricité-----</i> | |
| <i>11</i> | |
| <i>Figure II.1 : Schéma de l'appareil éolien-----</i> | <i>15</i> |
| <i>Figure II.2 : Eolienne tripale onshore-----</i> | <i>16</i> |
| <i>Figure II.3 : Eolienne bipale onshore-----</i> | |
| <i>16</i> | |
| <i>Figure II.4 : Eolienne offshore-----</i> | |
| <i>16</i> | |
| <i>Figure II.5 : Schéma d'une éolienne à axe horizontal en amont-----</i> | <i>17</i> |
| <i>Figure II.6 : Schéma d'une éolienne à axe horizontal en aval-----</i> | <i>17</i> |
| <i>Figure II.7 : Schéma de principe du rotor de Savonius-----</i> | |
| <i>18</i> | |
| <i>Figure II.8 : Eolienne à axe verticale de Darrieus-----</i> | |
| <i>19</i> | |
| <i>Figure II.9 : Schéma du constituant d'une éolienne tripale-----</i> | <i>19</i> |
| <i>Figure II.10 : Les composants d'une nacelle-----</i> | <i>21</i> |
| <i>Figure II.11 : Les éléments de la chaîne de conversion-----</i> | <i>22</i> |
| <i>Figure II.12 : Le synoptique de l'installation-----</i> | <i>23</i> |
| <i>Figure III.1 : Histogramme des Charges-----</i> | <i>32</i> |
| <i>Figure IV.1 : Variation de la Puissance en fonction de la vitesse du vent-----</i> | <i>39</i> |
| <i>Figure IV.2 : Schéma d'une batterie à plomb-----</i> | |
| <i>40</i> | |
| <i>Figure V.1 : Echelle du bruit en décibel-----</i> | <i>46</i> |
| <i>RAMBELOSON Olivier Léopold-----</i> | <i>2006</i> |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|------|
| <i>Tableau III.1 : Coefficient de simultanéité en fonction du nombre d'abonnées « i »-----</i> | 26 |
| <i>Tableau III.2 : Coefficient de simultanéité suivant le nombre-----</i> | 30 |
| <i>Tableau III.3 : Tableau des puissances -----</i> | 31 |
| <i>Tableau V.1 : Devis de l'éolienne -----</i> | |
| 42 | |
| <i>Tableau V.2 : Tableau des coûts -----</i> | 43 |
| RAMBELOSON Olivier Léopold----- | 2006 |

LISTE DES SYMBOLES ET UNITES

| Symboles | Désignation | Unités |
|-----------|---|----------|
| e | Consommation énergétique journalière d'un village | kWh |
| e_{ij} | Consommation d'un abonné de type « i » utilisant « j » équipements | kWh |
| c_{sij} | coefficient de simultanéité de l'utilisation des équipements type « j » de l'abonné type « i ». | |
| h_{ij} | Heures de marche des équipements de type « j » de l'abonné « j » | heure |
| a_{ij} | Nombre d'équipements de type « j » de l'abonné de type « i » ; | |
| E_1 | Consommation énergétique du village pendant la 1 ^{ère} année | kWh |
| p_i | Puissance journalière consommée par un abonné « i » utilisant les équipements électriques « j » | kW |
| P_{ij} | Puissance d'un équipement « j » utilisé par un abonné de type « i » | kW |
| P_1 | Puissance annuelle du village pendant la première année | kW |
| a_i | nombre d'abonnés de type « i » dans le village, | |
| c_i | coefficient de simultanéité de l'abonné de type « i » dans le village | |
| M | La masse d'air qui traverse le rotor en une seconde | kg |
| S | La surface engendrée par le rotor | m^2 |
| V | La vitesse du vent | m/s |
| φ | La masse volumique de l'air dans les Conditions Normales de la Température et de la Pression | kg/m^3 |
| Cp | Le Coefficient de puissance | |
| V_0 | Vitesse à la hauteur h_0 de référence au-dessus du sol | m/s |
| α | coefficient caractéristique du lieu | |
| C | la capacité de la batterie | Ah |
| E_{cj} | la consommation journalière | Wh /jour |
| n_j | le nombre jour d'autonomie de la batterie | |
| P_c | la puissance du convertisseur | kW |

INTRODUCTION

L'Electricité joue un rôle important dans le développement du monde rural. Le rôle social de l'électrification rurale consiste dans : l'édification d'une vie confortable dans le milieu rural et l'essor de la culture générale. A Madagascar la production d'électricité est assurée en majorité par des centrales thermiques et des centrales hydrauliques. Actuellement, vu les hausses des prix du pétrole, l'électrification rurale à partir des centrales thermiques devient économiquement difficile. Il est nécessaire de diversifier les ressources énergétiques de notre pays.

L'éolienne, cette nouvelle source d'énergie, compte tenu du potentiel considérable qu'elle offre, pourrait satisfaire la demande d'électricité dans les sites isolés. Dans la région de Tsiroanomandidy, on constate un gisement éolien assez important. Le réseau interconnecté de la Ji rama est assez loin. Une centrale éolienne peut être alors une solution pour l'électrification d'un village de Tsiroanomandidy. C'est pourquoi nous avons choisi le thème : « Contribution à l'étude de l'électrification de la région de Tsiroanomandidy par l'énergie éolienne : dimensionnement de la chaîne de conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique de l'installation éolienne. »

Dans la pratique, la conception d'une centrale éolienne est le travail d'une équipe. Notre but dans ce travail c'est de dimensionner les éléments dans la chaîne de conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique suivant la charge électrique du village considéré.

Le plan d'étude adopté pour atteindre ce but sera donc le suivant :

Chapitre 1 : Contexte énergétique du monde rural à Madagascar.

Chapitre 2 : Généralité sur l'énergie électrique d'origine éolienne

Chapitre 3 : Evaluation de la charge électrique du village type dans la région de Tsiroanomandidy.

Chapitre 4 : Dimensionnements des éléments de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne.

Chapitre 5 : Evaluation économique.

Chapitre 6 : Impacts environnementaux.

Chapitre I.CONTEXTE ENERGETIQUE DU MONDE RURAL A MADAGASCAR

1.1 *Historique de l'électrification à Madagascar [1]*

La société M.O. Florens a commencé la distribution de l'électricité aux environs de la ville d'Antananarivo en 1899.

En 1905, cette société a été remplacée par la Société civile d'Etudes de Concessions et de Travaux de Madagascar (S.E.C.T.M.).

En 1928, l'Energie Industriel la succédaient.

En 1939, l'Electricité et Eau de Madagascar (E.E.M.)

En 1974, Société Malgache de l'Electricité et de l'Eau (S.M.E.E.) étant la première société d'Etat.

A partir de 1975 jusqu'à présent, la société JIro sy RAno Malagasy (JI.RA.MA.) a pris en charge la production et le transport de l'électricité à Madagascar.

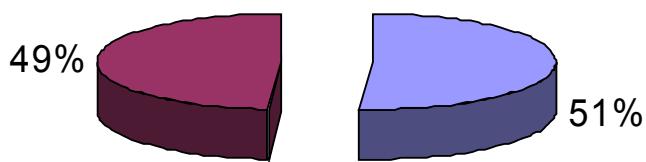
Actuellement, il y a 17 autres exploitants privés qui travaillent dans le secteur électricité à Madagascar.

1.2 *Situation de l'électricité à Madagascar [1]*

En 2004, la puissance totale installée à Madagascar est environ de 253 MW ; dont les 51% sont d'origines hydrauliques et les 49% sont assurée par les centrales thermiques dans les centres isolés.

Seulement 21% de la population malgache est électrifiée.

Figure I.1. Source de l'électricité à Madagascar



1.3 Politique de l'électrification rurale à Madagascar [1]

Dans le secteur électricité, le Gouvernement Malgache a fixé comme objectif de promouvoir la libéralisation du secteur électricité.

Ainsi, pour mener à terme ses actions, il a mis en place des projets de lois qui ont pour objets de créer

- le Fonds National de l'Electricité (F.N.E.)
- l'Agence pour le Développement de l'Electrification Rurale (A.D.E.R.)
- l'Office de la Régulation de l'Electricité (O.R.E.)

1.3.1 FNE

Il a pour rôle de contribuer au financement de l'électrification des zones rurales par :

- les prélèvements sur chaque énergie (kWh) consommée dans tous les centres d'exploitation (Ji rama, permissionnaires, concessionnaires),
- par la dotation versée au titre des pénalités financières infligées aux permissionnaires et aux concessionnaires du secteur de l'électricité.

1.3.2 ORE

L'office de la régulation de l'électricité a pour mission de:

- assurer la régulation de l'électricité
- Déterminer, publier et surveiller l'application correcte des prix plafonds c'est-à-dire la viabilité financière des opérateurs et les meilleurs prix pour les consommateurs. (Tarifs appliqués aux usagers finaux)
- Surveiller le respect de normes avant et au cours de l'exploitation :
 - Avant la mise en exploitation des installations, il établit le Procès Verbal de conformité des installations aux normes techniques.
 - Au cours de l'exploitation, il peut procéder au contrôle de conformité des installations par rapport aux normes techniques.

1.3.3 ADER

L'Agence de Développement de l'Electrification Rurale a pour mission :

- d'assurer la mise en œuvre de la politique d'électrification rurale et la gestion des outils associés,
- de promouvoir la fourniture de services du secteur,
- de superviser et financer les projets d'électrification rurale,
- d'assurer le suivi, l'évaluation socio-économiques et environnementales des projets,
- d'inciter et promouvoir l'émergence et la structuration du secteur : (groupement de représentation des clients ; mécanisme d'assurance des risques dommages et d'exploitations.

1.4 *Difficulté de l'électrification en milieu rural*

L'électrification des zones rurales de Madagascar sont caractérisées par :

- ◆ une faiblesse du pouvoir d'achat des paysans,
- ◆ un faible ratio de consommation de l'énergie électrique,
- ◆ une forte dispersion des villages.

Pour développer l'accès des paysans aux services énergétiques, il faut des sources d'énergie disponible localement et de faible coût d'exploitation. Les sources d'énergie renouvelable convient bien à ces conditions.

L'énergie éolienne peut jouer un rôle important pour le développement de l'électrification des zones rurales isolées.

L'inconvénient majeur de cette source d'énergie est la fluctuation du vent, mais elle possède aussi beaucoup d'avantages :

- ◆ exploitable dans plusieurs régions à Madagascar,
- ◆ faible coût d'exploitation
- ◆ source d'énergie écologique
- ◆ source d'énergie autonome.

C'est pourquoi dans le chapitre suivant, nous allons voir la généralité sur l'éolienne.

Chapitre II. GENERALITE SUR L'ENERGIE ELECTRIQUE D'ORIGINE EOLIENNE

2.1 *Introductions*

Exploité au début de l'ère industriel, le vent est devenu une source d'énergie.

Le nom éolien a été donné au moteur qui transforme l'Energie cinétique acquise par l'air propulsé à une certaine vitesse par le vent en énergie mécanique utilisable sur un arbre tournant.

Cette énergie mécanique est transformée en énergie électrique destinée à tous usagers grâce à un générateur électrique.

L'énergie électrique d'origine éolienne est alors considérée comme une plus prometteuse des énergies renouvelables à développer pour remplacer le charbon, le pétrole, le gaz.

La ressource éolienne disponible à l'échelle mondiale est évaluée à 57 000 TWh /an.

En théorie, l'énergie d'origine éolienne pourrait satisfaire la demande mondiale d'électricité. Mais, son principal inconvénient c'est la fluctuation du vent.

Tout procédé de transformation d'une forme d'énergie en une autre forme plus utilisable est complexe. Nous allons voir dans le paragraphe suivant les différents types d'éoliennes.

2.2 *Principes et présentations des différents types de capteur éolien*

Une éolienne permet de récupérer l'énergie cinétique du vent, le plus souvent pour produire de l'électricité, grâce aux éléments qui la composent

La présentation de l'appareil éolien est comme suit :

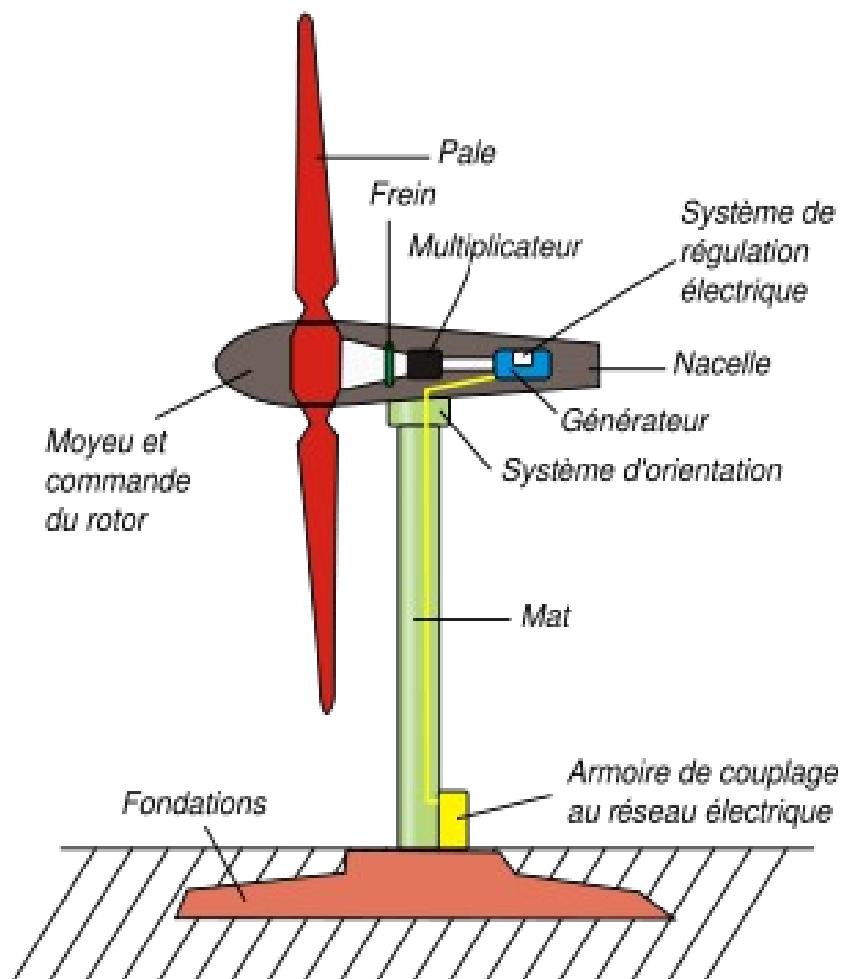


Figure II.1 Schéma de l'installation éolienne moderne connecté au réseau

Il existe deux grandes catégories d'éolienne :

- ♦ L'éolienne à axe horizontal ou les capteurs à axe horizontal
- ♦ L'éolienne à axe vertical ou les capteurs à axe vertical

2.2.1 Les capteurs à axe horizontal

L'axe de rotation supportant les pâles est horizontal.

Les pâles tournent dans un plan vertical. Actuellement, les éoliennes comportent généralement trois pâles (plus rarement deux pâles). Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical.

Ce système à axe horizontal nécessite un système d'orientation. Il a un bon potentiel dans les hauteurs dont le vent est régulier.

Pour l'éolienne à axe horizontal, il varie suivant le nombre de pâles :



Eolienne tripale onshore

Figure II.2



éolienne bipale onshore

figure II.3



éolienne offshore

figure II.4

Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal:

- **Amont** : le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.

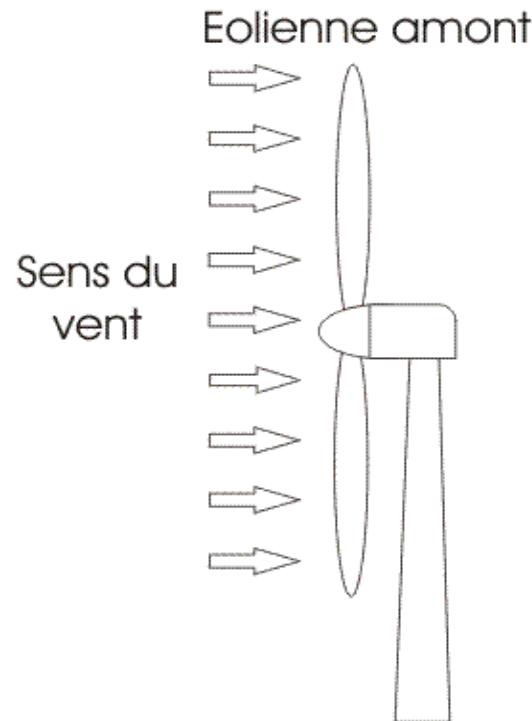


fig II.5 : Schéma d'une éolienne à axe horizontal amont

- **Aval** : le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto orientable.

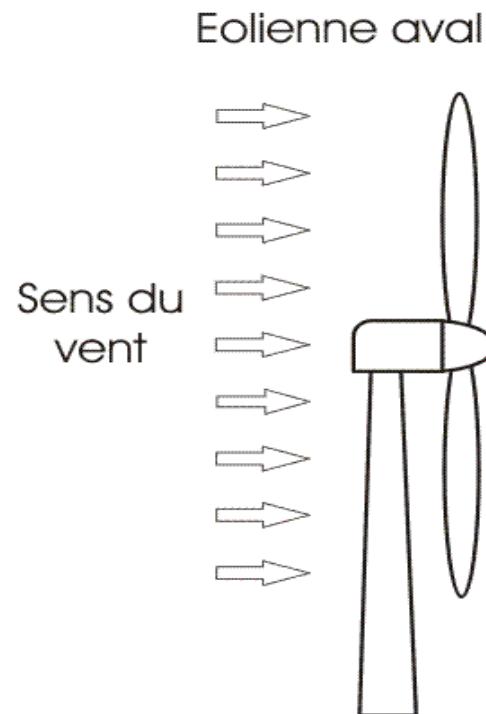


fig II.6 : Schéma d'une éolienne à axe horizontal aval

La disposition de la turbine en amont est la plus utilisée car plus simple et donne de meilleurs résultats pour les fortes puissances.

Les pales des éoliennes à axe horizontal doivent toujours être orientées selon la direction du vent.

Pour cela, il existe des dispositifs d'orientation de la nacelle en fonction de cette direction. Aujourd'hui, l'éolienne à axe horizontal avec un rotor du type hélice, présente un réel intérêt pour la production d'électricité à grande échelle.

2.2.2 Les capteurs à axe vertical

L'axe de rotation supportant les pales est vertical.

Il existe deux principaux modèles d'éoliennes à axe vertical :

- ◆ Les éoliennes avec traînée différentielle du type rotor Savonius
- ◆ Les éoliennes à pales tournantes du type rotor Darrieus

Ce système ne démarre pas seul et ne nécessite pas un système d'orientation.

Le système Darrieus est difficile à démonter tandis que le système Savonius a une technologie simple.

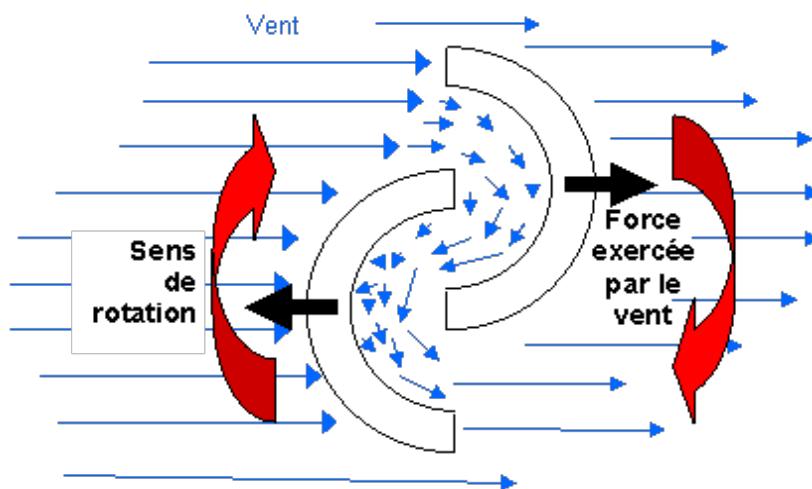


Fig II.7 : Schéma de principe du rotor de Savonius



Eolienne à axe vertical de Darrieus

Figure II.8

Dans ce chapitre, nous allons beaucoup plus parler de l'éolienne à axe horizontal.

2.3 Les éléments constituants d'une éolienne à axe horizontal

Une éolienne est constituée généralement de trois éléments :

- ◆ le rotor
- ◆ la nacelle
- ◆ le tour

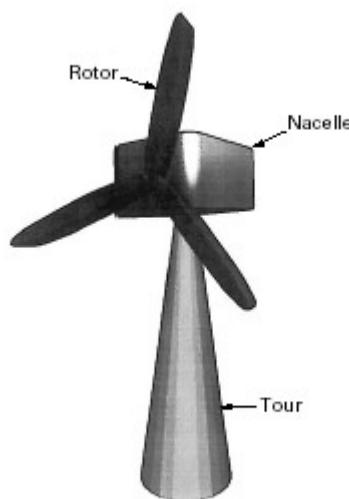


Figure II.9 Schéma du constituant d'une éolienne tripale

2.3.1 Le tour ou le mat

Son rôle est :

- d'une part de supporter ensemble le rotor et la nacelle,
- pour éviter que les pâles ne touchent pas le sol,
- de placer le rotor à une hauteur suffisante, de manière à sortir autant que possible le rotor du gradient de vent qui existe à proximité du sol, améliorant ainsi la captation de l'énergie.

2.3.2 Système d'orientation

Le système d'orientation est un système permettant le rotor de s'orienter vers la direction du vent.

2.3.3 Le rotor

C'est le capteur d'énergie qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Le rotor est un ensemble constitué des pâles et de l'arbre primaire.

2.3.4 Le système de protection et de régulation

Un contrôleur électronique chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne et aussi l'arbre secondaire comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance pour éviter l'emballement de machine.

2.3.5 Les multiplicateurs

Le multiplicateur de vitesse sert à éléver la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique.

En effet, la faible vitesse de l'éolienne ne permettait pas de générer du courant électrique dans de bonnes conditions avec les générateurs de courant classique.

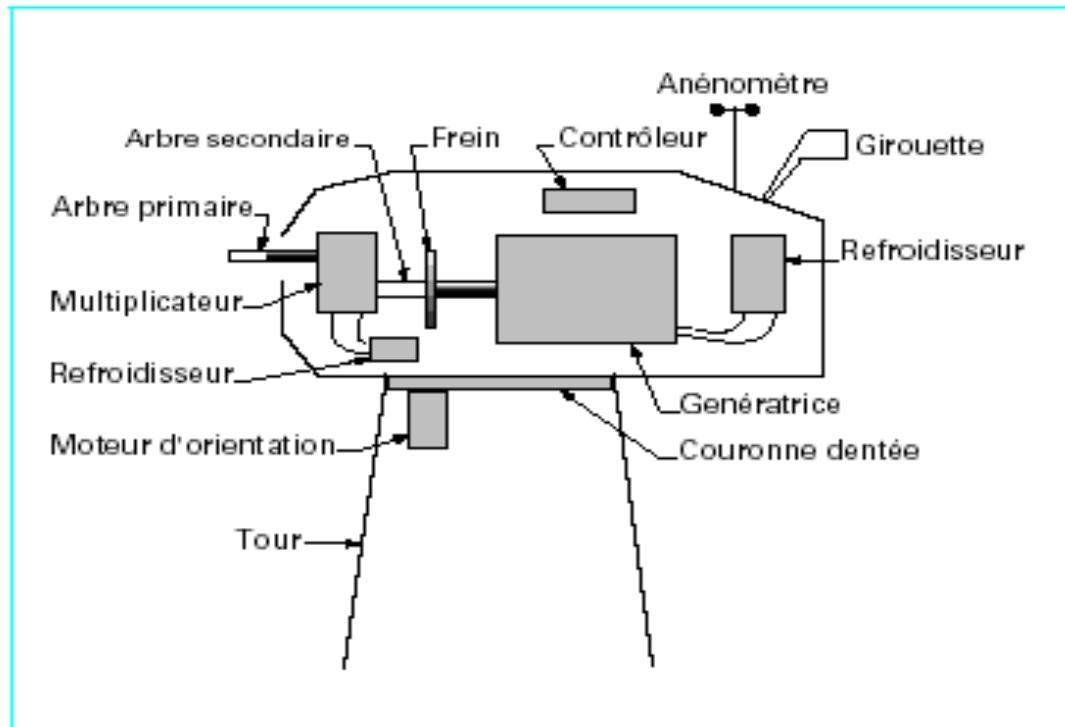


Figure II.10 Les composants de la nacelle

2.4 Les différentes technologies

- ⇒ Les machines les plus utilisées dans les éoliennes sont du type asynchrone avec un rotor à cage. C'est-à-dire environ 90% en 1997 et 60% en 2001.
- ⇒ Les génératrices asynchrones à rotor bobiné se sont développées ces dernières années de 3% en 1997 à 30% en 2001.
- ⇒ Les génératrices synchrones sont aussi utilisées dans les éoliennes.

En général, les éléments dans la chaîne de conversion de l'énergie du vent sont :

- Une turbine éolienne
- Une génératrice triphasée
- Un dispositif de connexion à une charge isolée ou au réseau de distribution interconnecté.

Les différentes technologies des éoliennes sont :

- Eoliennes à vitesse fixe,
- Eoliennes à vitesse variable,
- Eoliennes connectées au réseau interconnecté.

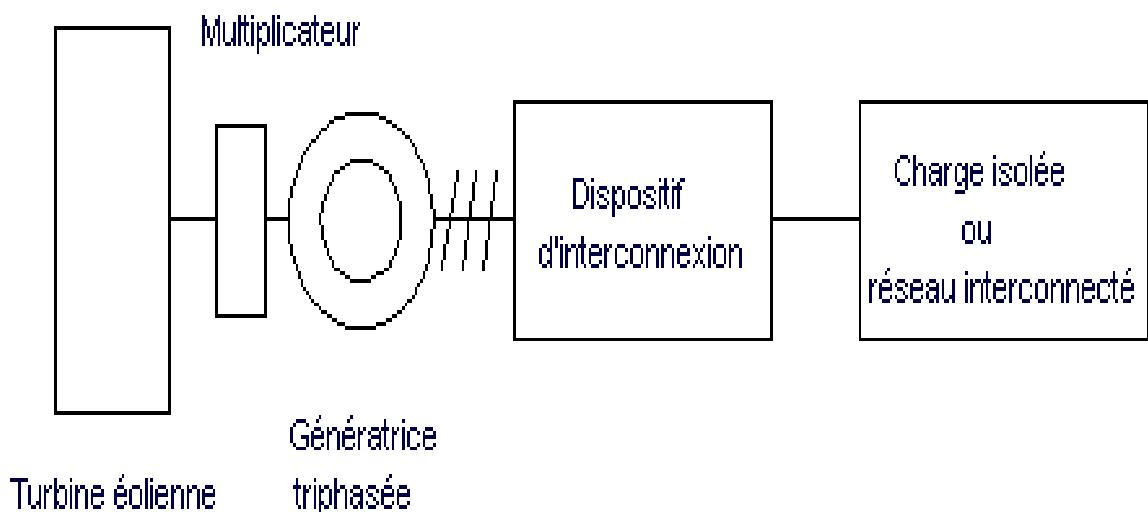


Figure II.11 : Les éléments de la chaîne de conversion

Pour l'électrification de notre village sise dans la région de Tsiroanomandidy, nous avons choisi l'éolienne à vitesse fixe en mode autonome.

La génératrice utilisée peut être une machine asynchrone à cage munie de capacités indispensables pour son excitation ou une machine synchrone à aimants permanents.

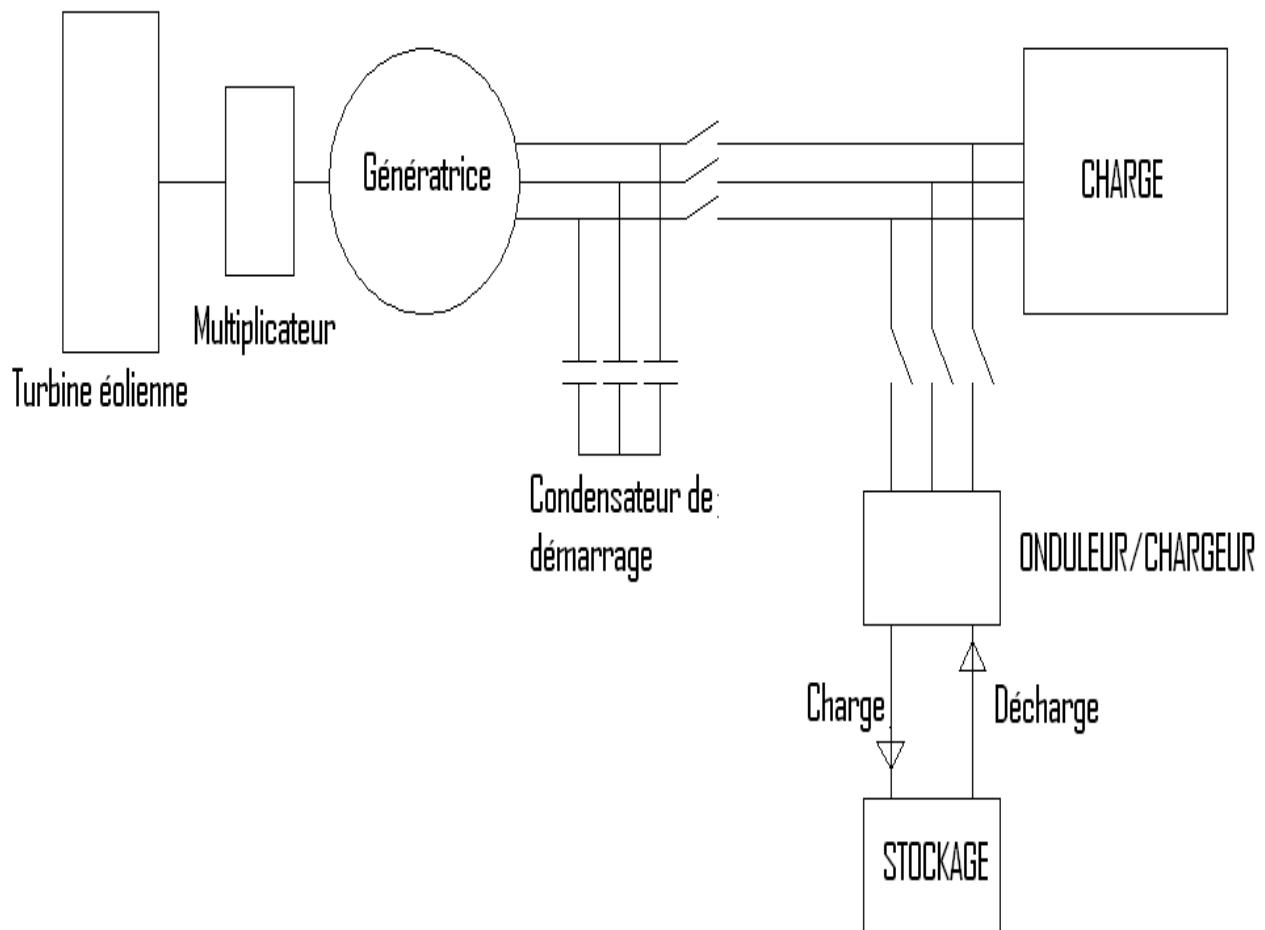


Figure II.12 : Synoptique de notre installation pour un village de Tsiroanomandidy

Notre éolienne fonctionne en mode autonome et alimente les charges du village. Pour cette configuration, le recours à un système de stockage est nécessaire en cas d'absence de groupe électrogène.

On utilise ici comme système de stockage les batteries acides / plomb.

Dans le chapitre suivant, avant de faire le dimensionnement de la chaîne de conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique, nous allons évaluer la demande en énergie de notre village.

Chapitre III. EVALUATION DE LA CHARGE ELECTRIQUE DU VILLAGE A TSIROANOMANDIDY

Pour bien définir la puissance de notre centrale électrique, il est obligatoire de connaître la demande énergétique du village avec une projection sur 15 ans.

Pour rentabiliser l'exploitation d'une centrale il faut que la production d'énergie électrique dépende du profil de la demande énergétique.

Actuellement, il faut tenir compte aussi la maîtrise de la consommation qui a pour objectif de réduire la consommation tout en conservant le même niveau de services.

La stratégie de la maîtrise de l'énergie se repose sur :

- ◆ La satisfaction des besoins
- ◆ La sécurité des approvisionnements
- ◆ Et la préservation de l'environnement

La maîtrise de la consommation électrique est nécessaire quand on utilise les énergies renouvelables comme source d'énergie.

3.1 **Forme générale de la consommation énergétique d'un village [4]**

3.1.1 **Evaluation des besoins énergétiques d'un abonné « i »**

Notons par « i » le type d'abonnés ; avec $i = 1, \dots, k$.

Notons par « j » le type d'équipements ; avec $j = 1, \dots, n$.

a_i : nombre d'abonnés,

c_i : coefficient de simultanéité des abonnés.

Le modèle de l'énergie consommée e_{ij} par les abonnés de type « i » de « n » équipements a pour expression :

$$e_{ij} = \sum_{j=1}^n c_{sij} a_{ij} h_{ij} P_{ij}, \quad (3.1)$$

Avec : c_{sij} : coefficient de simultanéité de l'utilisation des équipements type « j » de l'abonné type « i ».

a_{ij} : nombre d'équipements de type « j » de l'abonné de type « i » ;

h_{ij} : heures de marche d'équipement de type « j » de l'abonné de type « i » ;

P_{ij} : puissance d'équipement de type « j » de l'abonné de type « i » ;

3.1.2 Consommation énergétique journalière d'un village

La consommation énergétique journalière d'un village est déterminée par la formule suivante :

$$e = \sum_{i=1}^k c_i a_i \sum_{j=1}^n e_{ij} \quad (3.2)$$

Avec : e_{ij} : consommation d'un abonné de type « i » utilisant « n » équipements,

a_i : nombre d'abonnés de type « i » dans le village,

c_i : coefficient de simultanéité des abonnés de type « i » dans le village.

L'évaluation exacte de la consommation énergétique d'un abonné est difficile car elle dépend de plusieurs facteurs de caractères aléatoires, à savoir :

- le moment de branchement des équipements,
- les heures de marche des équipements,
- le fonctionnement du groupe des abonnés de même puissance, etc...

C'est pourquoi, dans la pratique, pour calculer la charge électrique d'un village, on utilise les coefficients de simultanéité pour tenir compte les caractéristiques aléatoires du comportement des abonnés.

D'après les expériences, on a établi les différentes valeurs des coefficients de simultanéité suivant le nombre des équipements identiques ou le nombre d'abonnés de même type.

Tableau III.1 : Coefficient de simultanéité en fonction du nombre d'abonnés ou des équipements

| Nombre (abonnés ou équipements) | 2 | 3 | 4-5 | 6-7 | 8-10 | 11-15 | 16-20 | 21-30 | 31-50 | 51-150 | >150 |
|---------------------------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|
| a_{ij} ou a_i | 0,85 | 0,8 | 0,75 | 0,7 | 0,65 | 0,6 | 0,55 | 0,5 | 0,45 | 0,4 | 0,35 |
| c_i ou c_{sij} | 0,85 | 0,8 | 0,75 | 0,7 | 0,65 | 0,6 | 0,55 | 0,5 | 0,45 | 0,4 | 0,35 |

3.1.3 Evaluation de la charge pour le cas d'un village à Tsiroanomandidy

Pour illustrer notre étude, nous avons pris un village rural de Tsiroanomandidy de 50 abonnés, constitué par trois types d'abonnés (i varie de 1 à 3);

- ◆ Le ménage de type 1 (3 points lumineux avec une radio) ;
- ◆ Le ménage de type 2 (plus de 3 points, une télévision avec un réfrigérateur) ;
- ◆ Le Centre de Santé de Base (CSB).

Nous trouvons dans le paragraphe suivant les caractéristiques des abonnés.

i = 1 : ménage de type 1; (nombre 30)

j = 1 : lampe (nombre 3, heure de marche 3h (18h à 21h), puissance 20W),
j = 2 : radio (nombre 1, heure de marche 12h (6h à 8h, 11h à 21h),
Puissance 10W)

i = 2 : ménage de type 2; (nombre 15)

j = 1 : lampe (nombre 5, heure de marche 3h (18h à 21h), puissance 20W),
j = 2 : radio (nombre 2, heure de marche 12h (6h à 8h, 11h à 21h),
Puissance 10W),

j = 3 : Téléviseur (nombre 1, heure de marche 6h (12h à 14h, 18h à 22h),
Puissance 90W),

j = 4 : Frigidaire (nombre 1, heure de marche 12h (1h marche et 1 arrêt) ,
Puissance 60W),

i = 3 : Centre de Santé de Base :

j = 1 : lampe (nombre 7, heure de marche 6h (18h à 23h), puissance 20 W),
j = 2 : radio (nombre 2, heure de marche 12h (6h à 8h, 11h à 21h),

Puissance 10W),

j = 3 : Téléviseur (nombre 1, heure de marche 6h (12h à 14h, 18h à 22h),

Puissance 90W),

j = 4 : Frigidaire (nombre 2, heure de marche 12h, puissance 60W).

3.2 Calcul de l'énergie consommée du village

Dans la pratique, dans certains cas lorsque la consommation est faible, c'est-à-dire ne comporte que des points lumineux inférieurs à trois, on ne tient pas compte les coefficients de simultanéité.

3.2.1 Evaluation de la consommation totale journalière

Type 1

Nombre : 30

Coefficient de simultanéité : 0.5

Type 2

Nombre : 15

Coefficient de simultanéité : 0.60

Centre de santé de Base

Nombre : 1

Coefficient de simultanéité : 1

En tenant compte des coefficients de simultanéité, des nombres d'équipements de type « j » et de l'abonné de type « i » et la consommation énergétique, la consommation totale journalière du village serait :

Soit **$e = 22,83 [kWh/jour]$**

Les détails se trouvent dans l'annexe 1.

3.2.1.1 Energie moyenne consommée en première année du village

Evaluons l'énergie moyenne consommée par les abonnés de nombre « k » et de « n » équipement en première année :

$$E_1 = 0,365[c_1a_1(e_{11} + e_{12} + \dots + e_{1n}) + c_2a_2(e_{21} + e_{22} + \dots + e_{2n}) + \dots + c_ka_k(e_{k1} + e_{k2} + \dots + e_{kn})]$$

$$E_1 = 0,365 \sum_{i=1}^k c_i a_i \sum_{j=1}^n e_{ij} \quad (3.3)$$

Avec e_{ij} : énergie consommée par un appareil « j » de l'abonné « i »,
 a_i : nombre d'abonnés,
 c_i : coefficient de simultanéité des abonnés.

Evaluation de la consommation totale en 1ère année :

$$E_1 = 0,365 \sum_{i=1}^k c_i a_i \sum_{j=1}^n e_{ij}$$

D'après le calcul, en appliquant la formule précédente, on trouve la consommation électrique annuelle en première année de notre village:

$$E_1 = 8334 \text{ [kWh/an]}$$

3.2.1.2 Evaluation de la puissance

La puissance P_j représente la puissance d'un abonné de type « i » utilisant les appareils « j » (radio, télévision, frigo ou autres),

$$p_i = \sum_{j=1}^n c_{sij} a_{ij} p_{ij}, \quad (3.4)$$

Soit en développant cette formule,

$$p_i = c_{s1} a_{i1} p_{i1} + c_{s2} a_{i2} p_{i2} + c_{s3} a_{i3} p_{i3} + \dots + c_{sn} a_{in} p_{in}$$

Finalement l'expression de la puissance annuelle en première année sera :

$$P_1 = 0,365 \sum_{i=1}^n c_i a_i p_i, \quad (3.5)$$

Soit, en développant la formule (3.5)

$$P_1 = 0,365 [c_1 a_1 (p_{11} + p_{12} + \dots + p_{1n}) + c_2 a_2 (p_{21} + p_{22} + \dots + p_{2n}) + \dots + c_k a_k (p_{k1} + p_{k2} + \dots + p_{kn})]$$

3.3 *Evaluation de la puissance demandée par le village*

Le tableau suivant montre les caractéristiques des abonnés du village à électrifier

| | Ménage type 1 | | | Ménage type 2 | | | Centre de Santé de Base | | | |
|-----------------|---------------|-------|-------|---------------|------------|------------|-------------------------|-------|------------|------------|
| | Lampe | Radio | Lampe | Radio | Télévision | Frigidaire | Lampe | Radio | Télévision | Frigidaire |
| Nombres | 3 | 1 | 5 | 2 | 1 | 1 | 7 | 2 | 1 | 2 |
| Coef | 1 | 1 | 0.75 | 1 | 1 | 1 | 0.7 | 1 | 1 | 1 |
| Puissance | 20 | 10 | 20 | 10 | 90 | 60 | 20 | 10 | 90 | 60 |
| Heure de marche | 3 | 12 | 3 | 12 | 6 | 12 | 6 | 12 | 6 | 12 |

Tableau III.2 : Les coefficients de simultanéités

| Type | 1 | 2 | 3 |
|----------------------|------------|------------|----------|
| nombre | 30 | 15 | 1 |
| a_i | 0,5 | 0,6 | 1 |

Dans le tableau suivant nous allons calculer la puissance journalière nécessaire pour le village à électrifier :

| Heure | Ménage type1 | | Ménage type2 | | | Centre de Santé de Base | | | | Total | |
|------------------------------|--------------|-------|--------------|-------|------------|-------------------------|-------|-------|------------|--------------|-------|
| | Lampe | Radio | Lampe | Radio | Télévision | Frigidaire | Lampe | Radio | Télévision | | |
| 0 | | | | | | 0,54 | | | | 0,54 | |
| 1 | | | | | | | | | 0,12 | 0,12 | |
| 2 | | | | | | 0,54 | | | | 0,54 | |
| 3 | | | | | | | | | 0,12 | 0,12 | |
| 4 | | | | | | 0,54 | | | | 0,54 | |
| 5 | | | | | | | | | 0,12 | 0,12 | |
| 6 | | | 0,18 | | 0,54 | | 0,02 | | | 0,74 | |
| 7 | | | 0,18 | | | | 0,02 | | 0,12 | 0,32 | |
| 8 | | | | | | 0,54 | | | | 0,54 | |
| 9 | | 0,15 | | | | | | | 0,12 | 0,27 | |
| 10 | | 0,15 | | | | 0,54 | | | | 0,69 | |
| 11 | | | | | | | | | 0,12 | 0,12 | |
| 12 | | | 0,18 | 0,81 | 0,54 | | 0,02 | 0,09 | | 1,64 | |
| 13 | | 0,15 | 0,18 | 0,81 | | | 0,02 | 0,09 | 0,12 | 1,37 | |
| 14 | | 0,15 | 0,18 | | 0,54 | | 0,02 | | | 0,89 | |
| 15 | | 0,15 | 0,18 | | | | 0,02 | | 0,12 | 0,47 | |
| 16 | | 0,15 | 0,18 | | 0,54 | | 0,02 | | | 0,89 | |
| 17 | | 0,15 | 0,18 | | | | 0,02 | | 0,12 | 0,47 | |
| 18 | | 0,15 | 0,18 | | 0,54 | 0,098 | 0,02 | | | 0,988 | |
| 19 | 0,9 | 0,15 | 0,675 | 0,18 | 0,81 | | 0,098 | 0,02 | 0,09 | 0,12 | 3,043 |
| 20 | 0,9 | 0,15 | 0,675 | 0,18 | 0,81 | 0,54 | 0,098 | 0,02 | 0,09 | | 3,463 |
| 21 | 0,9 | 0,15 | 0,675 | 0,18 | 0,81 | | 0,098 | 0,02 | 0,09 | 0,12 | 3,043 |
| 22 | | 0,15 | | | 0,81 | 0,54 | 0,098 | | 0,09 | | 1,688 |
| 23 | | | | | | | 0,098 | | | 0,12 | 0,218 |
| Puissance totale [kW] | | | | | | | | | | 22,83 | |

Tableau III.3: tableau des puissances

Les résultats du calcul sont :

| | | |
|---|---------------|-----------------|
| Consommation totale en 1ère année du village | 8334 | [kWh] |
| Puissance de pointe 1ère année | 3,46 | [kW] |
| Durée de fonctionnement de la puissance de pointe maximale | 2406,5 | [heures] |

3.3.1 Le profil des charges

D'après le tableau 3.3, on peut avoir le profil de charge

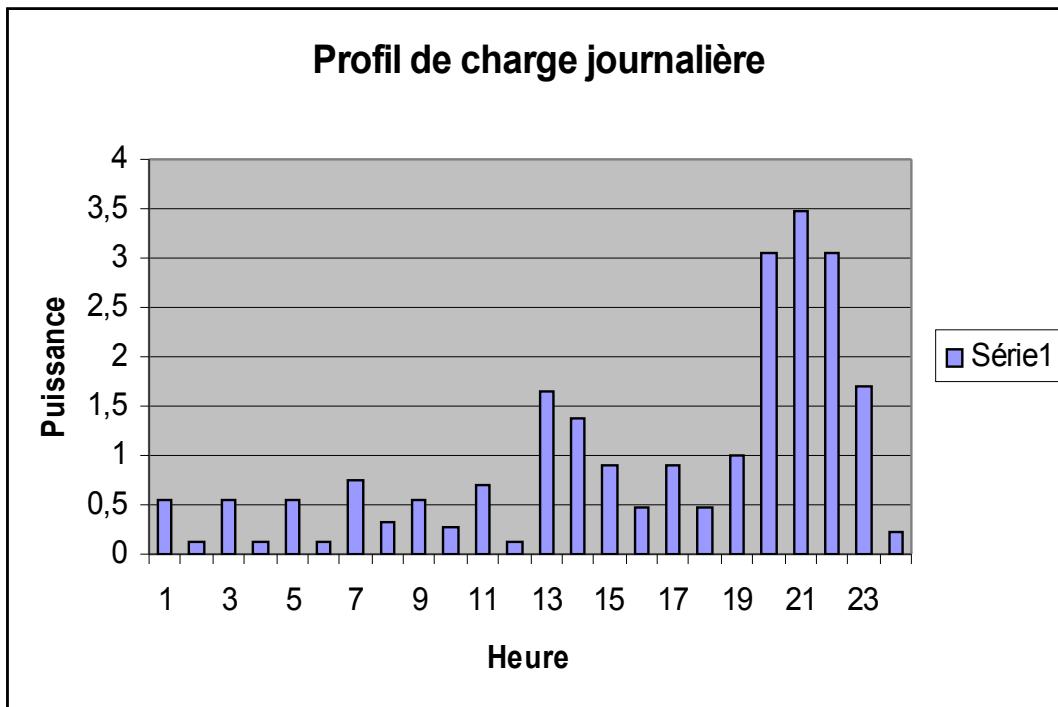


Figure III.1 : Histogramme des charges électriques du village

Le dimensionnement de notre éolienne dépend du profil de charge, plus précisément de la puissance de pointe.

La puissance maximale demandée par le village en première année vaut **3,46 kW**.

3.3.2 La durée de fonctionnement de la puissance maximale

C'est le rapport entre la consommation totale en première année du village et la puissance maximale.

La durée de fonctionnement de la puissance maximale est **2406,5 heures**.

3.3.3 La puissance nominale de la microcentrale

La durée de vie d'une centrale éolienne est de 30 ans. La puissance installée doit satisfaire la demande pendant au moins 10 ans.

La formule pour évaluer la puissance nominale de l'éolienne est la suivante :

$$P_n = P_1 (1 + \tau)^{n-1} \quad (3.6)$$

Avec P_1 : puissance nécessaire en première année,

P_n : puissance nécessaire en « n » ième année.

τ : Taux de croissance annuelle de la charge. On prend $\tau = 4\%$ pour notre village à Madagascar.

Nous estimons que la charge du village atteint la puissance de la micro centrale après 8 ans de fonctionnement.

$$P_8 = P_1 (1 + 0,04)^7 = 4,73 \text{ kW}$$

Après avoir déterminé la puissance nécessaire, dans le chapitre suivant, nous allons maintenant définir les puissances des éléments qui constituent la chaîne de conversion d'énergie de notre éolienne.

Chapitre IV. DIMENSIONNEMENT DES ELEMENTS DE LA CHAINE DE CONVERSION DE L'ENERGIE EOLIENNE

4.1 Partie théorique

4.1.1 L'aérodynamisme [4] [13]

L'expression de l'énergie cinétique vaut :

$$Ec = \frac{1}{2} MV^2 \text{ [J]} \quad (4.1)$$

Avec $M = \varphi SV \text{ [kg]} \quad (4.2)$

Où M : La masse d'air qui traverse le rotor en une seconde [kg]

S : La surface engendrée par le rotor $\text{[m}^2\text{]}$

V : La vitesse du vent [m/s]

φ : La masse volumique de l'air dans les Conditions Normales de la Température et de la Pression $\text{[kg/m}^3\text{]}$

On peut écrire :

$$Ec = \frac{1}{2} \varphi SV^3 \text{ [W]} \quad (4.3)$$

De ce fait la puissance mécanique qui traverse la section S est de :

$$P_{mec} = \frac{1}{2} \varphi SV^3 \text{ [W]} \quad (4.4)$$

Avec :

φ : Masse volumique de l'air (environ $1,23 \text{ kg/m}^3$ à 15°C)

V : vitesse du vent en m/s

S : section en m²

Formule de Betz

La puissance récupérable est inférieure, puisque l'air doit conserver une énergie cinétique résiduelle pour qu'il subsiste un écoulement.

Donc l'énergie récupérable est maximale lorsque :

$$V_{sortie} = \frac{1}{3} V_{incidente} \quad (4.5)$$

D'où la puissance théorique maximale récupérable est :

$$P_{th} = \frac{16}{27} P_{méc} = \frac{8}{27} \varphi S V^3 \quad (4.6)$$

4.1.2 Grandeurs caractéristiques : [7]

4.1.2.1 Le rendement η

Le rendement maximal théorique d'une éolienne η

$$\eta = \frac{P_{th}}{P_{méc}} \quad (4.7)$$

Où : P_{th} la puissance théorique maximale récupérable

P_{méc} la puissance mécanique

Ainsi ce rendement est fixé à 16/27, soit 59,3 %

4.1.2.2 Le coefficient de puissance Cp [4]

Le Coefficient de puissance représente le ratio entre la puissance du rotor et la puissance disponible dans le vent.

$$Cp = \frac{P_{rotor}}{P_{dispo}} \quad (4.8)$$

En tenant compte de la limite de Betz, Cpmax vaut donc 16 / 27 soit 0.5926.

4.2 Partie éolienne

4.2.1 Variation de la vitesse du vent V [4] ; [10]

La vitesse du vent varie en fonction de la hauteur h

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{h}{h_0} \right)^\alpha \quad (4.9)$$

D'où la relation $V = V_0 \left(\frac{h}{h_0} \right)^\alpha \quad (4.10)$

V_0 : Vitesse en m/s à la hauteur h_0 de référence au-dessus du sol

α : coefficient caractéristique du lieu entre 0,1 et 0,4

Pour une vitesse $v_0 = 6$ [m/s] à une hauteur $h_0 = 10$ [m]

A la hauteur $h = 8$ [m] la vitesse correspondant sera $v = 5,78$ [m/s]

4.2.2 Le diamètre de l'éolienne [7]

En appliquant la relation

$$P_a = 0,2D^2V^3 \quad (4.11)$$

On obtient l'expression du diamètre de l'éolienne :

$$D = \sqrt{\frac{P_a}{0,2V^3}} \quad (4.12)$$

Avec $P = \frac{P_u}{\eta_v}$ (4.13)

Où D : le diamètre de l'éolienne en [m]
 P_a : la puissance développée sur l'arbre de l'aérogénérateur en [W]
 V : la vitesse du vent
 P_u : la puissance utile en [W]
 η_v : le rendement au niveau du système multiplicateur de vitesse

4.2.3 La vitesse spécifique relative « λ »

La vitesse spécifique relative varie en fonction de la distance r .

$$\lambda = \lambda_0 \frac{r}{R} \quad (4.14)$$

Où : λ_0 la vitesse spécifique ($\lambda_0 = 6$ [m/s])
 r la distance entre l'axe de rotation de l'hélice et la section de la pale en [m]
 R le rayon de la pale en [m]

4.2.4 La vitesse de rotation

$$N = \frac{\lambda_0 V}{\pi D} \text{ en [tr/min]} \quad (4.15)$$

Où λ_0 la vitesse spécifique ($\lambda_0 = 6[\text{m/s}]$)

D le diamètre de l'éolienne en [m] ; avec D=2R

V la vitesse du vent en [m/s]

$\pi = 3,14$

4.3 Organe de transformation

Dans cette partie, on étudie l'aspect et la partie électrique de l'éolienne.

4.3.1 Le générateur électrique [8]

Dans les petites installations qui fonctionnent en général, de manière autonome, l'utilisation des dynamos à courant continu est de plus en plus délaissée au profit des alternateurs et les générateurs asynchrones excités par des batteries de condensateur.

Les générateurs à courant alternatif sont moins coûteux et ont un meilleur rendement que le dynamo.

En outre, après redressement, ils peuvent fournir du courant continu. La production de ce courant est intéressante car elle permet le stockage dans des batteries d'accumulation.

L'énergie du vent est l'énergie cinétique de l'air récupérable qui traverse une certaine surface S, la puissance associée est donc :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3$$

Cette puissance est alors transmise au générateur électrique.

La puissance du générateur électrique est donnée par cette relation :

$$P = \frac{1}{2} \sigma S V^3 \quad (4.16)$$

Avec σ : la masse volumique de l'air dans les CNTP ($\sigma = 1,25 \text{ [kg/m}^3\text{]}$)
 S : la surface balayée,
 V : la vitesse du vent à la hauteur d'implantation.

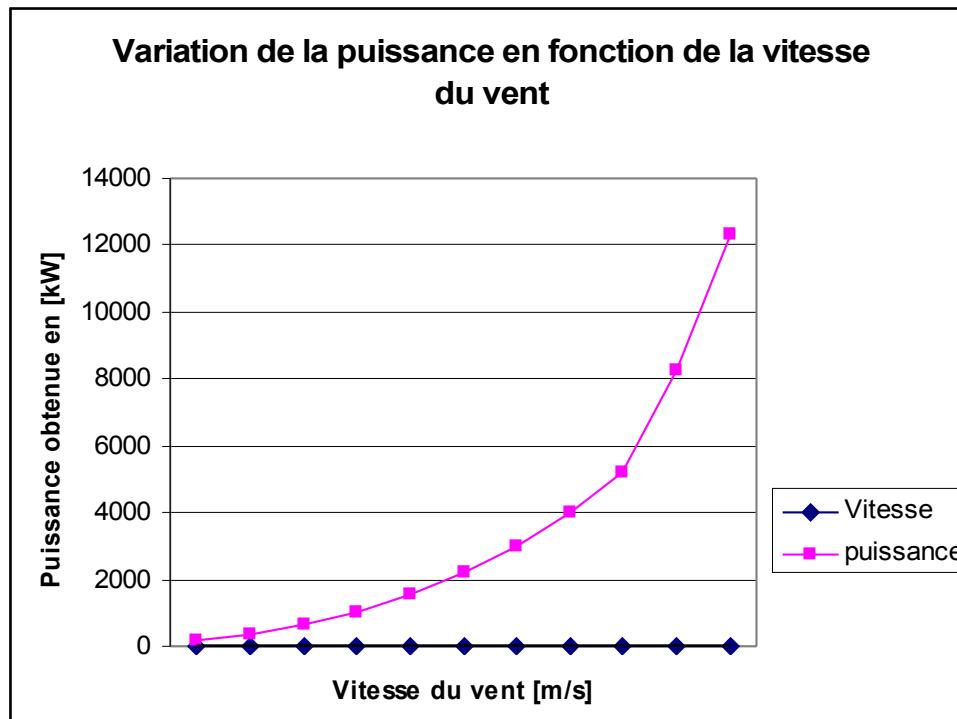


Figure IV.1 : Variation de la Puissance en fonction de la vitesse du vent

D'après la surface balayée diamètre $D = 7\text{m}$ et la vitesse $V_{\text{nom}} = 6 \text{ m/s}$, on obtient la puissance délivrée par les pâles :

$$P = 5,20 \text{ kW}$$

4.3.2 La batterie de stockage [8]

La batterie acide / plomb est un moyen pour stocker l'énergie électrique.

Leur contenance s'exprime en « **ampère heure** », c'est sa capacité.

Plus le nombre d'ampère heure est élevé et plus elle pourra fournir une forte énergie et aura une grande autonomie.

Ces batteries sont adaptées pour supporter des cycles de charge et de décharge consécutifs.

Contrairement à celle au démarrage, elle ne pourra fournir instantanément des puissances élevées, il faudra donc prévoir une batterie de plus grande capacité pour avoir une bonne autonomie.

La batterie se décharge lorsqu'elle livre de l'énergie au réseau local. Il ne faut jamais la vider complètement, car la décharge complète affecte beaucoup sur sa durée de vie.

Il est indispensable d'insérer un régulateur de charge et de décharge entre l'éolienne et les batteries.

Le fonctionnement du régulateur est commandé suivant l'état de charge du parc batterie.

Il y a différents types de batterie d'accumulateur. Mais les plus courants, utilisés dans le domaine de l'énergie renouvelable sont de type plomb/acide tubulaire stationnaire ou à plaque plane.

Par exemple, les batteries : 2V ; 1500 Ah,

6V; 50Ah, 100Ah,

12V; 50Ah, 200Ah, 300Ah

Nous trouvons dans la figure suivante la structure d'une batterie plomb / acide

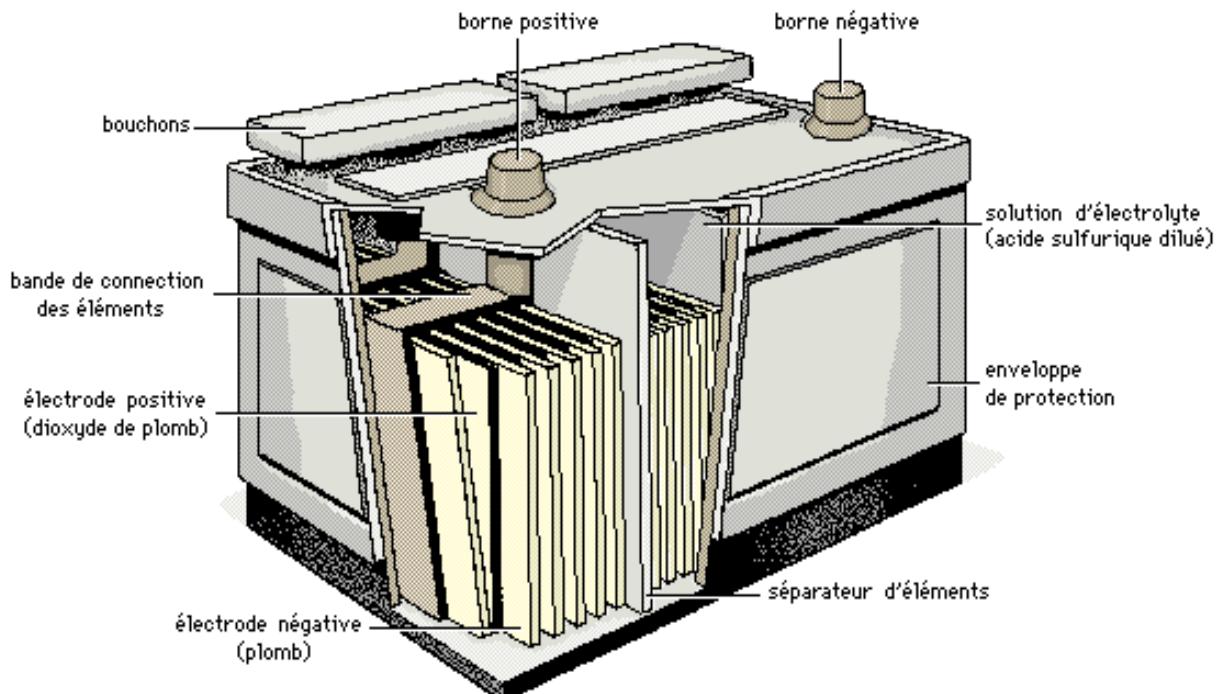


Fig. IV.2 : une batterie à plomb/acide

Calcul de la capacité

$$C_{[Ah]} = \frac{E_{cj} n_j}{k_d U_b} \quad (4.17)$$

Avec C la capacité de la batterie en [Ah]

E_{cj} la consommation journalière ($E_{cj} = 22833$ [W])

n_j le nombre jour d'autonomie de la batterie (3jours)

k_d le coefficient ($k_d = 0,8$)

U_b la tension de la batterie ($U_b = 48V$)

D'où la capacité de la batterie est 1783,8 [Ah]

Le nombre de la batterie est :

$$N_{bat} = \frac{C}{145} \quad (4.18)$$

D'où on peut utiliser 12 branches de batterie 48 V, **soit 48 batteries 12V, 145Ah.**

On peut utiliser aussi les batteries à usage professionnel comme les batteries 2V, 1500Ah, soit 24 batteries de 2V, 1500Ah.

4.3.3 L'onduleur convertisseur [8]

Venant de la batterie, le courant continu sera transformé en courant alternatif par l'intermédiaire du convertisseur pour être raccordé au réseau ou alimenter les équipements fonctionnant en courant alternatif.

D'après de notre calcul la puissance nominale nécessaire est de 3,46 kW, donc on va choisir un onduleur de puissance 5 [kVA]

Onduleur de puissance P = 5 [kVA]

Chapitre V. EVALUATION ECONOMIQUE

5.1 Prix et coût d'exploitation

Nous allons évaluer le coût d'investissement de notre installation éolienne.

Tableau V.1 : Devis estimatif de l'éolienne

| Désignation | Quantités | Coût unitaire (Ar) TTC | Montant (Ar) TTC |
|---------------------------------------|-----------|---------------------------|---------------------|
| Aérogénérateur 5kW et les accessoires | 1 | 26 225 500,00 | 26 225 500,00 |
| Batterie VIRIO 12 V 145Ah | 48 | 469 640,00 | 22 542 720,00 |
| Mat et Accessoires | 1 | 1 541 111,10 | 1 541 111,10 |
| Convertisseur Isophoton 5kW | 1 | 2 407 200,00 | 2 407 200,00 |
| TOTAUX | | | 52 716 532 |

Source : Energie technologie2006

Durant les 30 années de vie :

Le coût d'installation supposé à 30% du prix de l'éolienne comprenant la fondation et les coûts des câblages etc.

Le prix d'une éolienne à une puissance de 5 kW est estimé à 52 716 531,11 Ariary.

Le coût d'exploitation et d'entretien est évalué à 0,5% du coût totale de l'éolienne.

5.2 Définition [9]

- **Cash flow (C.F.)** : La mesure de la rentabilité d'un investissement repose essentiellement sur le concept de « **Cash Flow** ».

Un cash flow est le solde des flux de caisse engendrés par un investissement à la clôture d'une période.

- **Valeur Actuelle Nette (V.A.N.)** : Le principe de la valeur nette (actualisation) est très simple. Il consiste à sommer le cash flow engendré par un investissement.

On l'obtient en appliquant la formule suivante :

$$VAN = \sum_{p=1}^n F_p (1 + i)^{-p} - I \quad (5.1)$$

Où F_p : Flux net de trésorerie de la période p (Revenu généré par un investissement au cours de cette période)

I : Capital investi

n : la durée de vie du projet

i : taux d'actualisation (10%)

- **Indice de profitabilité (I.P.)** : permet de rapprocher le coût d'investissement de cash flow qu'il engendre c'est-à-dire il est égal à la somme des flux actualisés, rapporté à l'investissement initial. Il est donné par la formule suivante :

$$IP = \frac{\sum_{p=1}^n F_p (1 + i)^{-p} - I}{I} = 1 + \frac{VAN}{I} \quad (5.2)$$

Tableau V.2 : Tableau des coûts

| | Système éolien |
|---------------------------|-----------------|
| Coût | 52 716 531,11Ar |
| Consommation énergétique | 8 334 kWh |
| Coût de consommation / an | 3 333 618 Ar |

Le coût d'actualisation est estimé à 10%

$$V.A.N. = 13 228 094,308 - 52 716 531,11$$

$$= - 39 488 436,802$$

$$I.P. = 0,251$$

Au terme, ces valeurs montrent que le système éolien autonome est trop cher.

Avec indice de profitabilité de $I.P = 0,215$; on pourrait donc considérer que l'installation d'un système éolien autonome est un investissement rentable à long terme.

Chapitre VI. IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

6.1 *Introduction*

La production d'électricité par des aérogénérateurs ne contribue pas au renforcement de l'effet de serre (pas de rejet de CO₂ ou de méthane), aux pluies acides (pas de rejets de soufre ou d'azote), et à la production de déchets toxiques ou radioactifs.

La production fait appel à des matériaux et procédés classiques.

L'installation sur le site est rapide et n'engendre pas de perturbations irréversibles. A noter que tout projet de centrale éolienne doit faire l'objet d'une analyse des impacts visuels (intégration dans le paysage), sonores et sur l'avifaune.

Pour l'installation offshore, les aérogénérateurs ne perturbent pas les comportements des oiseaux car ils changent leur trajectoire avant d'être dans les turbulences de l'éolienne.

Les transports routiers et les lignes haute tension tuent bien plus d'oiseaux que quelques éoliennes.

6.2 *Effets de l'éolienne sur l'environnement [11]*

Par définition, une éolienne moderne ne peut être qu'écologique :

- pas d'émission de gaz ni de particules,
- pas de déchets toxiques ou radioactifs,
- pas d'effluent, aucun rejet, respect complet de la qualité de l'air, bref, l'énergie propre par excellence.

6.3 Niveau sonore des éoliennes [12]

Concernant l'impact sonore, oui, les éoliennes émettent un bruit qui a principalement pour origine le glissement de l'air sur les pales.

Une machine de grosse puissance (500 kW) produit un niveau de pression acoustique d'environ 50 dB (A) à 150 mètres. Ce bruit, soit l'équivalent d'un bruit dans un bureau.

Le bruit diminue rapidement lorsqu'on s'éloigne. Une éolienne est généralement inaudible à 400 mètres.

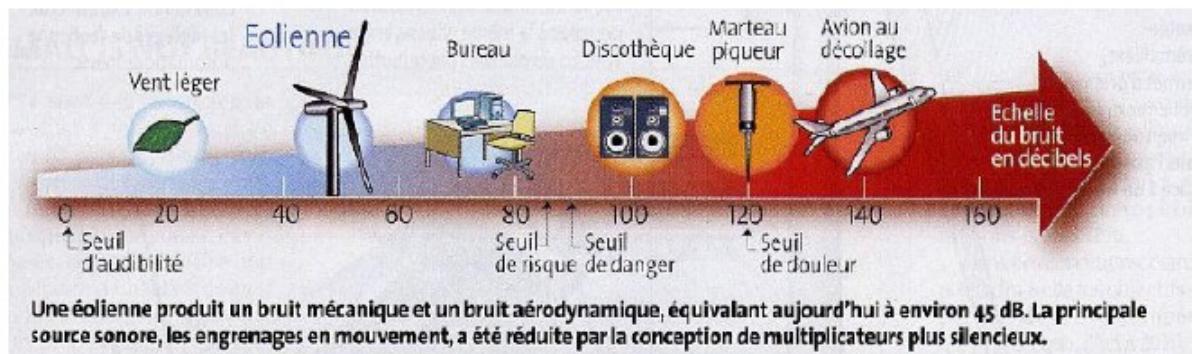


figure V.1 : Echelle du bruit en décibels

Des formules de propagation sont systématiquement appliquées lors des études d'impacts et permettent d'anticiper tout gêne pour les voisins les plus proches.

6.4 Quelques mesures à prendre avant l'installation de l'éolienne

Pour l'aérogénérateur plus de 12 mètres de hauteur, un permis de construire est obligatoire.

Une étude d'impact pour les projets de puissance supérieure de 2.5 [MW] et une notice d'impact en delà de cette puissance.

De plus, pour prévenir toutes perturbations des ondes radios, une agence nationale de fréquence (OMERT) doit gérer la répartition des fréquences et les servitudes radioélectriques sur l'ensemble du territoire.

Toute construction élevée (80 mètres) nécessite une autorisation de l'aviation civile et de l'armée.

Il est interdit l'installation près d'un aéroport et d'un aérodrome et par contre les installations doivent comporter des systèmes de balisage destiné à les rendre visibles pour les avions le jour et la nuit.

Les pâles, dépassant 50 mètres de longueur, doivent équiper d'un feu clignotant à leur extrémité.

Pour les nuisances sonores des éoliennes :

Le vent qui s'engouffre dans le rotor et les vibrations induites par les liaisons mécaniques entre l'arbre du rotor et la génératrice constituent les 2 seules sources de bruit potentiel émanant d'une éolienne. La technologie avancée s'emploie constamment à réduire de manière très notable l'impact sonore des éoliennes :

- le profil des pales est optimisé et permet de diminuer la vitesse de rotation de la machine.
- les bruits mécaniques sont maîtrisés grâce à une structure d'engrenages de précision et des arbres de rotors montés sur coussinets amortisseurs.

Les éoliennes ont des bons potentiels dans :

- les régions côtières
- les crêtes de longues pentes
- les terrains découverts
- les vallées où le vent s'engouffre

CONCLUSION

Au terme de cette étude, on a pu constater que l'Energie électrique d'origine éolienne commence à se développer et tient une place importante dans l'électrification des zones rurales enclavées.

Pour le village dans la région de Tsiroanomandidy, au début, nous proposons l'éolienne autonome avec une génératrice asynchrone à cage, branchée avec un parc batterie qui est relié à un bloc contenant un onduleur et un chargeur.

La demande en énergie électrique de notre village est évaluée 8334 kWh par an en première année. La puissance nécessaire, en première année est de 3,46 kW, et après 8 ans 4,73 kW.

Pour satisfaire cette charge, nous avons choisi une éolienne de puissance 5 kW. Le parc batterie est formé de 48 batteries de 12V/ 145Ah. Le bloc onduleur / chargeur possède une puissance de 5kVA.

L'investissement initial estimatif nécessaire est de 52 716 532 Ariary. Nous avons trouvé que l'indice de profitabilité IP de notre projet est de 0,215; c'est-à-dire que le projet est rentable à long terme.

A l'avenir, lorsque la puissance de pointe demandée dépasse 6 kW, notre éolienne peut être soutenue par un groupe électrogène, dans ce cas notre installation sera une installation hybride qui fonctionne 24h sur 24 h.

Nous espérons que cette étude contribuera à l'amélioration de la connaissance des étudiants en 3 années licence et à l'étude de l'électrification rurale à Madagascar.

Annexes

Annexe

Annexes

ANNEXE 1

La consommation totale

Enquête sur l'évaluation des charges auprès du village

nombre

$a_1 =$ 30

Coefficient de simultanéité

$c_1 =$ 0,5

j = 1: Lampe

Nombre

$a_{11} =$ 3

Coefficient de simultanéité

$c_{s11} =$ 1

Heure de marche

$h_{11} =$ 3 [heures]

Puissance

$p_{11} =$ 20 [W]

j = 2 : Radio

Nombre

$a_{12} =$ 1

Coefficient de simultanéité

$c_{s12} =$ 1

Heure de marche

$h_{12} =$ 12 [heures]

Puissance

$p_{12} =$ 10 [W]

i = 2: ménage de type 2; (nombre 15)

nombre

$a_2 =$ 15

Coefficient de simultanéité

$c_2 =$ 0,60

j = 1: Lampe

Nombre

$a_{21} =$ 5

Coefficient de simultanéité

$c_{s21} =$ 0,75

Heure de marche 3 [heures]

Annexes

| | |
|--|-------------|
| $h_{21} =$ | |
| Puissance | |
| $p_{21} =$ | 20 [W] |
| $j = 2 : \text{Radio}$ | |
| Nombre | |
| $a_{22} =$ | 2 |
| Coefficient de simultanéité | |
| $c_{s22} =$ | 1 |
| Heure de marche | |
| $h_{22} =$ | 12 [heures] |
| Puissance | |
| $p_{22} =$ | 10 [W] |
| $j = 3: \text{Télévision}$ | |
| Nombre | |
| $a_{23} =$ | 1 |
| Coefficient de simultanéité | |
| $c_{s23} =$ | 1 |
| Heure de marche | |
| $h_{23} =$ | 6 [heures] |
| Puissance | |
| $p_{23} =$ | 90 [W] |
| $j = 4 : \text{Frigidaire}$ | |
| Nombre | |
| $a_{24} =$ | 1 |
| Coefficient de simultanéité | |
| $c_{s24} =$ | 1 |
| Heure de marche | |
| $h_{24} =$ | 12 [heures] |
| Puissance | |
| $p_{24} =$ | 60 [W] |
| <u>$i = 3: \text{Centre de santé de base}$</u> | |
| nombre | |
| $a_3 =$ | 1 |
| Coefficient de simultanéité | |
| $c_3 =$ | 1 |
| $j = 1: \text{Lampe}$ | |
| Nombre | |
| $a_{31} =$ | 7 |
| Coefficient de simultanéité | |
| $c_{s31} =$ | 0,7 |

Annexes

Heure de marche

$h_{31} =$ 6 [heures]

Puissance

$p_{31} =$ 20 [W]

j = 2 : Radio

Nombre

$a_{32} =$ 2

Coefficient de simultanéité

$C_{s32} =$ 1

Heure de marche

$h_{32} =$ 12

Puissance

$p_{32} =$ 10

j = 3: Télévision

Nombre

$a_{33} =$ 1

Coefficient de simultanéité

$C_{s33} =$ 1

Heure de marche

$h_{33} =$ 6 [heures]

Puissance

$p_{33} =$ 90 [W]

j = 4: Frigidaire

Nombre

$a_{34} =$ 2

Coefficient de simultanéité

$C_{s34} =$ 1

Heure de marche

$h_{34} =$ 12 [heures]

Puissance

$p_{34} =$ 60 [W]

**Consommation totale en 1ère
année du village**

[kWh /an

8334,045]

Annexes

$$E_1 = 0,365 \sum_{i=1}^k c_i a_i \sum_{j=1}^n e_{ij}$$

$$E = 0,365 \times 22833$$

$$E = 8334,045[\text{kWh/an}]$$

La consommation totale journalière :

$$e = \sum_{i=1}^k c_i a_i \sum_{j=1}^n e_{ij}$$

$$e = 22,83[\text{kWh/jour}]$$

Evaluation de la puissance :

| i = 1: ménage de type 1; (nombre 15) | | |
|---|-------------|-------------------|
| nombre | $a_1 =$ | 30 |
| Coefficient de simultanéité | $c_1 =$ | 0,5 |
| j = 1: Lampe | | |
| Nombre | $a_{11} =$ | 3 |
| Coefficient de simultanéité | $c_{s11} =$ | 1 |
| Heure de marche | $h_{11} =$ | 3 [heures] |
| Puissance | $p_{11} =$ | 20 [W] |
| j = 2 : Radio | | |
| Nombre | $a_{12} =$ | 1 |
| Coefficient de simultanéité | $c_{s12} =$ | 1 |
| Heure de marche | $h_{12} =$ | 12 [heures] |
| Puissance | $p_{12} =$ | 10 [W] |
| Consommation abonnée type 1 | | 4,50 [kWh] |
| i = 2: ménage de type 2; (nombre 15) | | |
| nombre | $a_2 =$ | 15 |
| Coefficient de simultanéité | $c_2 =$ | 0,6 |

Annexes

| j = 1: Lampe | | |
|---------------------------------------|-------------|---------------------|
| Nombre | $a_{21} =$ | 5 |
| Coefficient de simultanéité | $c_{s21} =$ | 0,75 |
| Heure de marche | $h_{21} =$ | 3 [heures] |
| Puissance | $p_{21} =$ | 20 [W] |
| j = 2 : Radio | | |
| Nombre | $a_{22} =$ | 2 |
| Coefficient de simultanéité | $c_{s22} =$ | 1 |
| Heure de marche | $h_{22} =$ | 12 [heures] |
| Puissance | $p_{22} =$ | 10 [W] |
| j = 3: Télévision | | |
| Nombre | $a_{23} =$ | 1 |
| Coefficient de simultanéité | $c_{s23} =$ | 1 |
| Heure de marche | $h_{23} =$ | 6 [heures] |
| Puissance | $p_{23} =$ | 90 [W] |
| j =4 : Frigidaire | | |
| Nombre | $a_{24} =$ | 1 |
| Coefficient de simultanéité | $c_{s24} =$ | 1 |
| Heure de marche | $h_{24} =$ | 12 [heures] |
| Puissance | $p_{24} =$ | 60 [W] |
| Consommation abonnée type 2 | | 15,525 [kWh] |
| i = 3: Centre de santé de base | | |
| nombre | $a_3 =$ | 1 |
| Coefficient de simultanéité | $c_3 =$ | 1 |
| j = 1: Lampe | | |
| Nombre | $a_{31} =$ | 7 |
| Coefficient de simultanéité | $c_{s31} =$ | 0,7 |
| Heure de marche | $h_{31} =$ | 6 [heures] |
| Puissance | $p_{31} =$ | 20 [W] |
| j = 2 : Radio | | |
| Nombre | $a_{32} =$ | 2 |
| Coefficient de simultanéité | $c_{s32} =$ | 1 |
| Heure de marche | $h_{32} =$ | 12 |
| Puissance | $p_{32} =$ | 10 |
| j = 3: Télévision | | |
| Nombre | $a_{33} =$ | 1 |

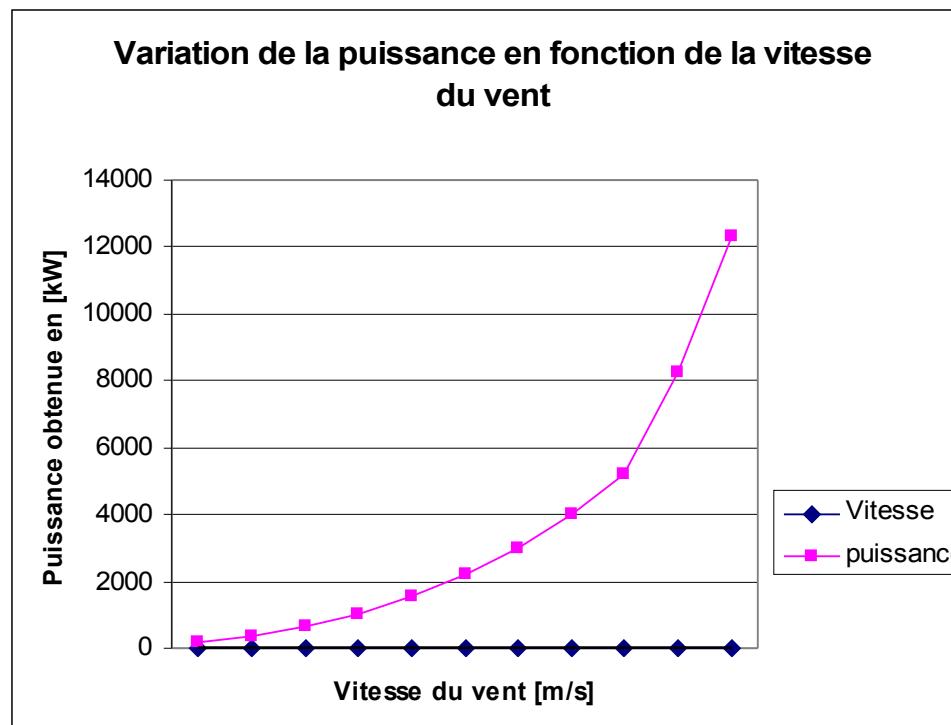
Annexes

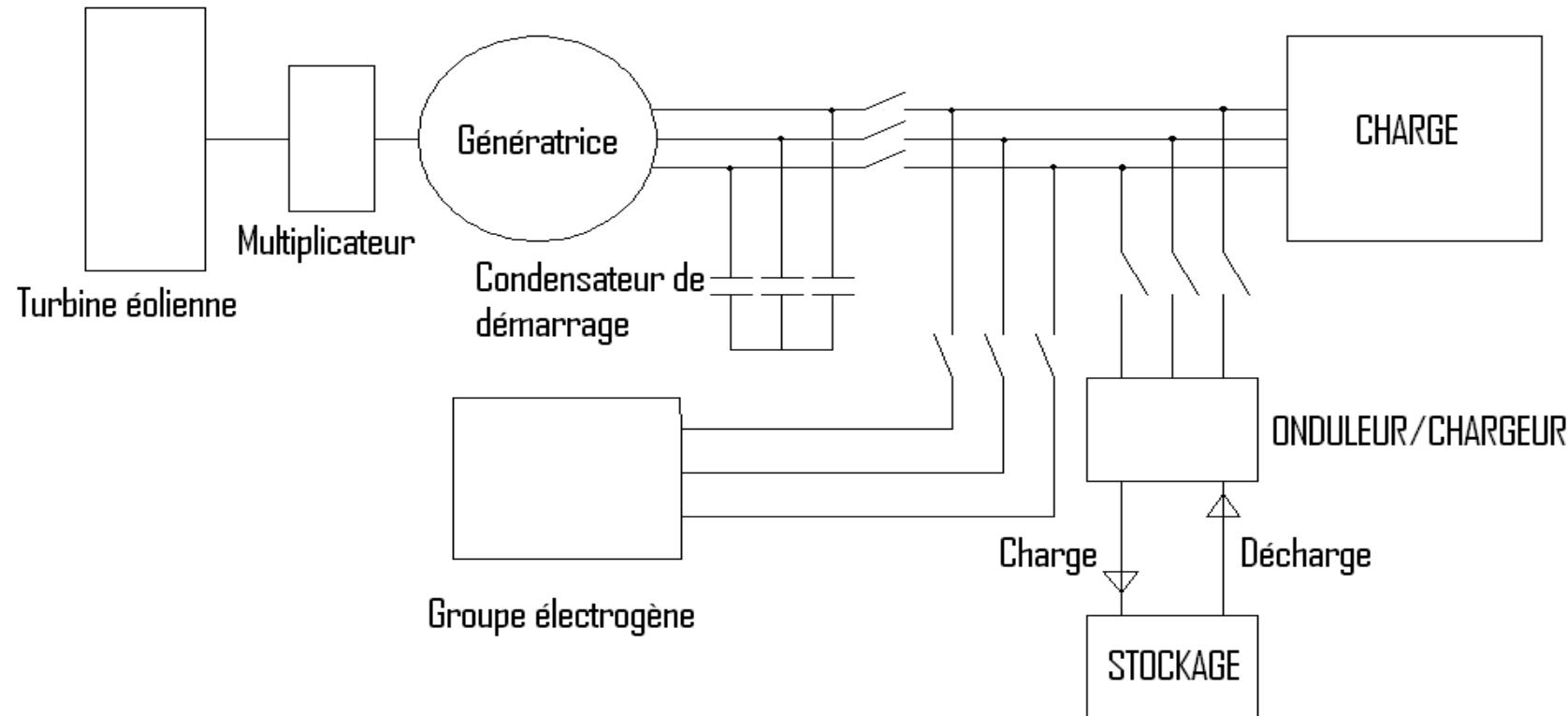
| | | | |
|---|-------------|---------------|----------|
| Coefficient de simultanéité | $c_{s33} =$ | 1 | |
| Heure de marche | $h_{33} =$ | 6 | [heures] |
| Puissance | $p_{33} =$ | 90 | [W] |
| <i>j = 4: Frigidaire</i> | | | |
| Nombre | $a_{34} =$ | 2 | |
| Coefficient de simultanéité | $c_{s34} =$ | 1 | |
| Heure de marche | $h_{34} =$ | 12 | [heures] |
| Puissance | $p_{34} =$ | 60 | [W] |
| Consommation type 3 | | 2,81 | [kWh] |
| Consommation totale par jour | | 22,83 | [kWh] |
| Consommation totale en 1ère année du village | | 8334,0 | [kWh] |

La variation de la puissance en fonction de la vitesse du vent

| | |
|---------------------------|--------|
| Densité | 1,25 |
| Diamètre [m] | 7 |
| Surface [m ²] | 38,465 |

| Vitesse | 2 | 2,5 | 3 | 3,5 | 4 | 4,5 | 5 | 5,5 | 6 | 7 | 8 |
|---------|-------|-------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| P = | 192,3 | 375,6 | 649,1 | 1 030,7 | 1 538,6 | 2 190,7 | 3 005,1 | 3 999,8 | 5 192,8 | 8 245,9 | 12 308,8 |





Synoptique une installation Hybride (Eolienne / Groupe)

BIBLIOGRAPHIE ET WEBOGRAPHIE

[1] : Ministère de l'Energie des Mines doc « électrification rurale à Madagascar »

[2] : Ministère de l'Energie des Mines ; décret N°2003-510 instituant l'Agence de Développement de l'Electrification Rurale.

[3] : Ministère de l'Energie des Mines ; loi N°2002-001 portant création du Fonds National de l'Electricité.

[4] : Désiré le GOURIERE « théorie, conception et calcul pratique des installations, énergie éolienne »

[5] : RAKOTONIAINA Solofo Hery ; Energie technologie pour le développement durable « Notion d'énergie »

[6] : RAKOTONIAINA Solofo Hery ; Energie technologie pour le développement durable « développement énergétique durable »

[7] : RANDRIAMANALINA Herimino Daniel « la contribution d'une ferme éolienne pour l'électrification d'un village isolé à Madagascar ».Mémoire de fin d'études. Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo 2004.

[8] : RAKOTONIAINA Solofo Hery .Cours Technologie des panneaux solaires. Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo 2006

[9] : RANDRIAHERINDRAINY Selmer. Cours Rentabilité des investissements. Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo 2006.

[10] : www.retscreen.net.

[11] : <http://www.energies-renouvelables.org/observer/>

[12] : <http://generationsfutures.chez-alice.fr/energie/eolien.htm>.

[13] Cunty, G., Éolienne et aérogénérateurs. Guide de l'énergie éolienne. Edisud ed. 2001.

Auteur : RAMBELOSON Olivier Léopold

Titre : « Contribution à l'étude de l'électrification de la région de Tsiroanomandidy par l'énergie éolienne : Dimensionnement de la chaîne de conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique de l'installation éolienne »

Nombre de pages : 48

Nombre de tableaux : 5

Nombre de figures : 17

RESUME

L'énergie électrique d'origine éolienne est une source d'énergie fluctuante qui nécessite un système de stockage puissant pour supporter la décharge.

La demande en énergie du village est de 8334 kWh/an. La puissance de pointe demandée après 8 ans est estimée à 4,73 kW. La puissance de l'installation sera 5 kW. La capacité du parc batterie nécessite 48 batteries de 145 Ah et l'onduleur sera 5 kVA.

Mots clés : éolienne autonome, éolienne hybride, aérogénérateur, régulateur, batteries accumulateurs, convertisseur, génératrice asynchrone.

Rapporteur : RAKOTONIAINA Solofo Hery. Enseignant à l'Ecole Supérieure

Polytechnique d'Antananarivo

Adresse de l'auteur : Lot BA 12 Ampitatafika Antananarivo Atsimondrano Tana 102

Téléphone : 032 41 000 02