



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO



FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDE ENVUE DE L'OBTENTION DU
DIPLOME D'ETUDE APPROFONDIE EN SCIENCE PHYSIQUE
OPTION ENERGETIQUE**

Intitulé :

**GISEMENT EOLIEN A
MADAGASCAR**

Présenté par

Monsieur RAKOTOARIVELO Robert Tantelinirina

Devant la commission d'examen composée de :

Président : Madame RANDRIAMANANTANY Zely Arivelo Professeur Titulaire

Rapporteur : Madame RAKOTO JOSEPH Onimihamina Maitre de conférences

Examineurs : Monsieur RAKOTOMALALA Minoson Sendrahasina Professeur Titulaire

Monsieur RASAMIMANANA François de Salle Maitre de conférences





UNIVERSITE D'ANTANANARIVO



**FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE
OPTION : ENERGETIQUE**



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDE ENVUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
D'ETUDE APPROFONDIE EN SCIENCE PHYSIQUE OPTION
ENERGETIQUE**

Intitulé :

GISEMENT EOLIEN A MADAGASCAR

Présenté par

Monsieur RAKOTOARIVELO Robert Tantelinirina

Devant la commission d'examen composée de :

Président : Madame RANDRIAMANANTANY Zely Arivelo Professeur Titulaire

Rapporteur : Madame RAKOTO JOSEPH Onimihamina Maître de conférences

Examineurs : Monsieur RAKOTOMALALA Minoson Sendrahasina Professeur Titulaire

Monsieur RASAMIMANANA François de Salle Maître de conférences

Le 09 mai 2015



REMERCIEMENTS

Avant tout, je rends grâce à Dieu pour sa bienveillance, soutien, miséricorde et protection tout au long de notre étude ce qui a conduit à l'achèvement de cet ouvrage.

Ce présent n'a pu être achevé sans l'intervention de plusieurs personnes. Ainsi, je tiens à adresser mes sincères remerciements à :

- Monsieur RAHERIMANDIBY Marson Professeur Titulaire, Doyen de la Faculté des Science à l'Université d'Antananarivo de m'avoir laissé soutenir mon mémoire de fin d'étude;
- Monsieur RAKOTONDRAMANANA Hery Tiana Maître de conférences, Chef de Département de Physique.
- Monsieur RAKOTOMALALA Minoson Sendrahasina Professeur Titulaire directeur de l'IME ou Institut pour la Maîtrise en Energie.
- Madame RAKOTO JOSEPH Onimihamina Directeur de ce mémoire qui, malgré ses lourdes responsabilités, a bien voulu partager ses connaissances et m'encadrer durant toute l'élaboration de cet ouvrage.

Aux membres du jury qui ont pris de leur temps pour ce mémoire :

- Madame RANDRIAMANANTANY Zely Arivelo Professeur Titulaire – UA
- Monsieur RAKOTOMALALA Minoson Sendrahasina Professeur Titulaire- UA
- Monsieur RASAMIMANANA François de Salle Maître de conférences - UA

Je ne saurais oublier tous les enseignants au département de la Physique surtout de l'option Energétique qui nous ont instruits durant ces Cinq années d'études.

Mes remerciements sont aussi adressés à ma famille pour leur soutien et encouragement, ainsi qu'à tous mes amis et mes collègues.

Mes vifs remerciements aussi à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Table des matières

| | |
|--|----|
| REMERCIEMENTS | i |
| INTRODUCTION..... | 1 |
| Partie I) LE VENT | 2 |
| I.1) GENERALITES SUR LE VENT | 3 |
| I.2) ORIGINE DU VENT | 3 |
| I.3) CARACTERISATION HORIZONTALE DE LA VITESSE DU VENT..... | 3 |
| I.4) MESURE DU VENT..... | 4 |
| I.5) MESURE DE LA VITESSE DE VENT | 4 |
| I.6) CONVERSION DE LA VITESSE DE VENT | 5 |
| I.7) LES DONNES DU VITESSE DE VENT | 6 |
| I.8) UTILISABILITES DES DONNES DU VENT..... | 7 |
| I.9) LES QUANTITES D'ENERGIES DANS LE VENT..... | 8 |
| I.10) MODELES D'AJUSTEMENT | 8 |
| I.10.1) Distribution de Weibull | 9 |
| I.10.2) Distribution hybride de Weibull | 9 |
| I.10.3) Distribution de Rayleigh..... | 10 |
| I.10.4) LA LIMITE DE BETZ..... | 10 |
| I.11) CARACTERISTIQUES | 10 |
| I.11.1) IRREGULARITES SPATIALES..... | 11 |
| I.11.2) IRREGULARITES TEMPORELLE..... | 12 |
| I.11.3) ENERGIES DU VENT RECUPEERABLE..... | 13 |
| Partie II) L'EOLIENNE | 14 |
| II.1) L'énergie éolienne | 15 |
| II.1.1) Différents types d'aérogénérateurs..... | 15 |
| II.2) Les potentiels en ressources d'énergies renouvelables à Madagascar | 23 |
| II.2.1) L'énergie Solaire:..... | 24 |
| II.2.2) Le solaire photovoltaïque | 25 |
| II.2.3) L'Energie Hydraulique:..... | 25 |
| II.2.4) La Biomasse (bioénergies): | 29 |
| Partie III) Le gisement éolien proprement dite | 30 |
| III.1) Présentation du logiciel de calcul utilisé: RETScreen4. | 31 |
| III.1.1) Brève description | 31 |

| | |
|--|----|
| III.1.2) Organigramme | 31 |
| III.1.3) Modèle pour projets de centrale éolienne | 32 |
| III.1.4) L'énergie éolienne à Madagascar | 32 |
| III.1.5) Carte du vent à madagascar | 33 |
| III.1.6) Simulation et collecte des données par le logiciel RETScreen..... | 35 |
| Conclusion..... | 44 |

LISTE DES ABREVIATIONS

JIRAMA : Jiro sy Rano Malagasy

ADER : Agence pour le Développement de l'Electrification Rurale

EAH : Eoliennes à Axes Horizontale

EAV : Eoliennes à Axe Verticale

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| Figure 1: un anémomètre..... | 4 |
| Figure 2: répartition de la vitesse de vent en fonction du relief rencontré et de l'altitude (source : énergies éoliennes)..... | 12 |
| Figure 3: Exemple d'irrégularités temporelles du vent (source : livre énergies éoliennes)..... | 13 |
| Figure 4: Les éoliennes à axes horizontale (EAH) et à axe verticale (EAV)..... | 15 |
| Figure 5: Carte d'irradiation moyenne annuelle de l'Afrique Source : Rapport de diagnostic du Secteur Energie (Cabinet AIDES – 2012)..... | 24 |
| Figure 6 : Source: JIRAMA - Direction de l'Equipement Electricité | 28 |
| Figure 7: Organigramme du modèle RETScreen | 31 |
| Figure 8: vitesse moyenne du vent par Fonkotany Source : ADER..... | 34 |
| Figure 9: courbe de puissance et d'énergie pour Antananarivo /Ivato..... | 37 |
| Figure 10: courbe de puissance et d'énergie pour fianarantsoa | 39 |
| Figure 11: courbe de puissance et d'énergie pour Mahajanga | 40 |
| Figure 12: courbe de puissance et d'énergie pour Antsiranana..... | 42 |
| Figure 13: courbe de puissance et d'énergie pour Toliary | 43 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|----|
| Tableau 1: correspondances entre valeur de la vitesse en km/h et en m/s | 5 |
| Tableau 2: correspondances entre valeur de la vitesse en km/h, en m/s, en nœuds et en degré Beaufort..... | 6 |
| Tableau 3: correspondances entre vitesse moyenne du vent et régime éolien | 7 |
| Tableau 4: effets du vent en fonction de sa vitesse | 11 |
| Tableau 5: documentation du fabricant concernant les différents types de mini-système engendrant du courant continu. | 19 |
| Tableau 6: type des capteurs, classification et caractéristique. (Source : énergies éoliennes). 23 | |
| Tableau 7: Production de la JIRAMA entre Janvier et Juillet 2013 : (Source : JIRAMA/DPS) | 26 |
| Tableau 8: Puissance installée pour l'électrification rurale (Réalisation de 2004 à 2012) (Source ADER)..... | 27 |
| Tableau 9: le nom des régions avec sa vitesse moyenne de vent annuelle. | 36 |
| Tableau 10: vitesse de vent, courbe de puissance et d'énergie pour Antananarivo | 37 |
| Tableau 11: vitesse de vent, courbe de puissance et d'énergie pour Fianarantsoa | 38 |
| Tableau 12: vitesse de vent, courbe de puissance et d'énergie pour Mahajanga. | 40 |
| Tableau 13: vitesse de vent, courbe de puissance et d'énergie pour Antsiranana..... | 41 |
| Tableau 14: vitesse de vent, courbe de puissance et d'énergie pour Toliary. | 43 |

LISTE DES PRINCIPAUX SYMBOLES ET UNITES

| SYMBOLES | DESIGNATION | UNITES |
|-----------------|--------------------------|-------------------|
| ρ | Masse volumique de l'air | Kg/m ³ |
| V | Vitesse | m/s |
| S | Section | m ² |
| P | Puissance | kW |
| W | Energie | J |
| K | facteur de forme | |
| C | facteur d'échelle | m/s |
| α | Coefficient de rugosité | |
| h | hauteur | m |

INTRODUCTION

Depuis la nuit des temps, la technologie n'a cessé d'évoluer. Cette technologie des connaissances scientifiques dans la vie quotidienne est passée de la guerre du feu à la création de l'électricité. L'Energie constitue un secteur clé du développement d'un pays. En effet, l'ensemble des secteurs d'activités dans un pays a besoin d'Energie pour fonctionner afin de contribuer à la croissance économique et à l'amélioration de la vie sociale de la population.

Pour les spécialistes du développement, la consommation énergétique constitue un indicateur du niveau de développement du dynamisme de l'économie d'un pays. Ainsi, chaque pays élabore sa politique de l'Energie en assurant la mise à disposition de ressources énergétiques en quantité suffisante, correspondant aux besoins de ses utilisateurs en termes de qualité, d'efficacité et de sécurité, et qui leur sont accessibles physiquement et économiquement. L'énergie électrique est alors devenue une énergie indispensable à l'homme tant dans son foyer que dans son travail. Non seulement elle rend la vie des habitants confortables mais aussi elle est source de développement économique d'un pays.

Normalement dans un pays, tout le monde doit jouir équitablement du même développement quel que soit l'endroit où il se trouve. Cependant, à Madagascar seulement 2% des villages ruraux accèdent à l'électrification à cause de leur éloignement aux centrales hydrauliques et du coût élevé de l'énergie fossile des centrales thermiques.

Face à la crise énergétique rencontrée par Madagascar provoquée par l'augmentation du prix de pétrole et la faillite rencontrée par le JIRAMA premier producteur de l'énergie électrique dans notre pays est pour anticiper la fin des énergies fossiles, il est nécessaire de chercher à diversifier et rajouter les ressources énergies. De prétexte éolienne, photovoltaïque, hydraulique, géothermique, marémotrice, ou autre, les énergies renouvelables sont les seules ressources d'énergie alternatives capables de répondre au besoin énergétique de notre pays.

En effet, ces sources d'énergies renouvelables sont très abondantes dans la grande ile .est c'est pour cela que nous avons choisi comme thème de mémoire « *le gisement éolien à Madagascar* »

Pour bien mener à terme notre projet, on va diviser en trois grandes partie dont : la première partie concerne le vent, dans la seconde partie on parlera de l'éolienne, et pour terminer la troisième partie sera consacrée au gisement éolien proprement dite.

Partie I) LE VENT

I.1) GENERALITES SUR LE VENT

Le vent est un fait complexe dont on peut donner une description simple. Le réchauffement de la terre par le soleil varie selon les endroits, c'est à-dire selon que le ciel de l'endroit chauffé est couvert de nuages que l'endroit est en plein soleil ou qu'il est recouvert d'eau. L'air des endroits plus chauds se réchauffe devient moins dense et monte. Ce faisant, il crée une zone de basse pression dans laquelle s'engouffre l'air des zones voisines dont la pression est plus élevée. Cet air en mouvement, c'est le vent.

I.2) ORIGINE DU VENT

Du fait que la géométrie sphérique de la terre, le rayonnement solaire absorbé diffère aux pôles et à l'équateur. En conséquence, l'énergie captée à l'équateur est supérieure à celle absorbée aux pôles. Cette variation a emporté une différence de température en deux points qui provoque des différences de densité de masse d'air provoquant leur déplacement d'une altitude à une autre. Ces déplacements ont été influencés par la force de Coriolis qui s'exerce perpendiculairement à la direction du déplacement vers l'Est dans l'hémisphère Nord et vers l'Ouest dans l'hémisphère Sud.

On pourrait facilement prévoir la direction des vents dominants si elles n'étaient pas perturbées par les orages, les dépressions cycloniques ou les obstacles naturels.

I.3) CARACTERISATION HORIZONTALE DE LA VITESSE DU VENT

La puissance énergétique éolienne moyenne disponible, associée à une circulation d'une masse d'air à une vitesse $\langle V \rangle$ et agissant sur une surface A, de la roue d'une éolienne

$$\text{s'écrit : } \langle P \rangle = \frac{1}{2} \rho A \langle V^3 \rangle$$

indique la masse volumique, paramètre qui varie avec la température et la latitude. Mais souvent considérée comme constante et avoisinant en moyenne 1.25 kg/m³.

L'expression antécédente indique que la puissance disponible varie avec la vitesse, cubique moyenne du vent. Cette dernière est déterminée à partir d'un traitement statistique des données brutes du vent et le calcul des fréquences à un seuil donné de vitesse.

I.4) MESURE DU VENT

Actuellement, il existe différents systèmes de mesure et d'enregistrement de la direction et de la vitesse du vent. Selon les normes internationales, le vent est mesuré à une hauteur de 10 mètres au-dessus du sol et sa vitesse moyenne est enregistrée toutes les 10 minutes. Parmi la vitesse moyenne et la direction du vent, certaines stations ont enregistrées d'autres informations, comme la vitesse maximale qui apparaît durant la période de mesure.

Les données du vent sont enregistrées depuis des dix ans au moins dans les pays industrialisés et archivés dans des bases de données.

En général, ces données sont utilisées pour des études du climat (par exemple aération des villes) ou des projets de travaux dans lequel le vent joue un rôle important (par exemple construction de ponts, gratte-ciels, téléphériques, aéroports, etc.). Et, depuis que le pétrole brut est connue une hausse de prix au niveau de la marché internationale, pour la cartographie de l'énergie éolienne (par exemple Atlas de Vent du Danemark, pays pionnier dans ce domaine.)

Aujourd'hui, dans le marché on voit des systèmes relativement moins chers pour mesurer, enregistrer et éditer les données du vent mesurées pendant des mois ou des années.

I.5) MESURE DE LA VITESSE DE VENT

La vitesse du vent est mesurée au moyen d'un instrument appelé *anémomètre* (Figure1), qui tourne plus rapidement que le vent souffle fort. Un consigneur de données permet d'enregistrer instantanément la vitesse du vent ou de la stocker en mémoire abord de son utilisation lors d'une analyse ultérieure. Une girouette montre la direction du vent. On consigne normalement la vitesse du vent en kilomètres à l'heure (km/h) ou en mètres par seconde (m/s) : $1 \text{ m/s} = 3,6 \text{ km/h}$. On indique la direction du vent en degrés d'azimut ou en points de boussole.

Schéma d'un anémomètre

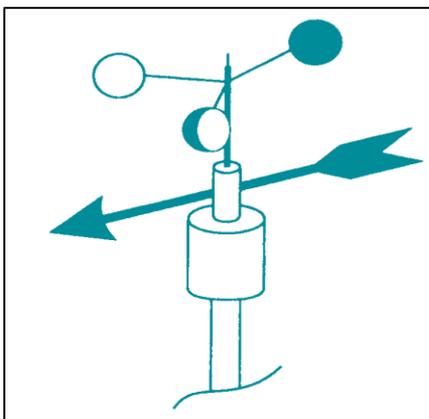


Figure 1: un anémomètre

1.6) CONVERSION DE LA VITESSE DE VENT

La vitesse du vent est généralement mesurée en mètres par seconde, en kilomètres à l'heure. Elle peut être aussi mesurée en nœuds ou en degré Beaufort.

Voici quelque formule qui relie ces différentes unités.

$$1 \text{ m/s} = 3,6 \text{ km/h}$$

$$\text{Km/h} = \text{nœud} * 1,852$$

$$1 \text{ Km/h} = 0,5 \text{ nœud}$$

Voici quelques tableaux qui indiquent les correspondances entre valeurs de la vitesse en différents unités.

| m/s | Km/h |
|-----|------|
| 4 | 14,4 |
| 6 | 21,6 |
| 8 | 28,8 |
| 10 | 36,0 |
| 12 | 43,2 |
| 14 | 50,4 |
| 16 | 57,6 |

Tableau 1: correspondances entre valeur de la vitesse en km/h et en m/s

| nœuds | Beaufort | m/s | Km/h |
|---------|----------|-------------|---------|
| <1 | 0 | 0 - 0.2 | <1 |
| 1 - 3 | 1 | 0.3 - 1.5 | 1 - 5 |
| 4 - 6 | 2 | 1.6 - 3.3 | 6 - 11 |
| 7 - 10 | 3 | 3.4 - 5.4 | 12 - 19 |
| 11 - 15 | 4 | 5.5 - 7.9 | 20 - 28 |
| 16 - 21 | 5 | 8.0 - 10.7 | 29 - 38 |
| 22 - 27 | 6 | 10.8 - 13.8 | 39 - 49 |

| | | | |
|---------|----|-------------|---------|
| 28 – 33 | 7 | 13.9 -17.11 | 50 - 61 |
| 34 – 40 | 8 | 17.2 – 20.7 | 62 - 74 |
| 41 – 47 | 9 | 20.8 – 24.4 | 75 - 88 |
| 48 – 55 | 10 | 89 – 102 | 55 - 63 |

Tableau 2: correspondances entre valeur de la vitesse en km/h, en m/s'en nœuds et en degré Beaufort

I.7) LES DONNES DU VITESSE DE VENT

La vitesse du vent indique la vitesse de déplacement horizontal de l'air. Sa valeur numérique subit des variations très fréquentes et parfois de forte amplitude : elle oscille sans cesse autour d'une valeur moyenne, animée par une succession rapide de chutes de vitesse et de rafales. Par conséquent, la donnée d'une mesure instantanée à un instant unique, isolé n'est absolument pas représentative. Du fait de son importante variabilité. La vitesse du vent doit être appréhendée de trois points de vue différents :

Celui de la vitesse instantanée du vent : cette vitesse du vent correspond à une approche purement cinématique de la vitesse, s'appuyant sur les représentations quasi infinitésimales du temps et de l'espace. Elle est fournie pratiquement sur un site donné par chacune des mesures qu'y effectue l'anémomètre pendant de très brefs intervalles de temps successifs (une fois toutes les demi-secondes, par exemple).

Celui de la vitesse moyenne du vent : La vitesse moyenne du vent correspond à la moyenne arithmétique sur un long intervalle de temps (10 minutes, par exemple) des nombreuses vitesses instantanées du vent mesurées sur le site durant cet intervalle.

Juste une telle valeur numérique directement calculée par l'anémomètre permet de passer d'une définition simplement cinématique à une définition utilisable en mécanique des fluides : le vent y devient l'une des propriétés quantitatives d'une parcelle d'air concordant à une certaine échelle de temps et de l'espace, qui dépend de la densité du réseau de mesure ou de prévision du vent et de la fréquence des prévisions ou des mesures qui y sont effectuées ; celui de la vitesse maximale du vent. La vitesse maximale du vent a été mesurée dans le même intervalle de temps que la vitesse moyenne dont nous venons de parler :

Elle fournit la plus élevée des vitesses de pointe atteintes par les rafales ayant pu être enregistrées pendant cet intervalle ; son intérêt est d'autant plus grand qu'elle donne une idée concrète du degré de turbulence du vent, des actions que son souffle est capable de susciter et donc, parfois, des dégâts qui peuvent en résulter (les actions que produit le vent, en effet,

dépendent souvent moins de sa vitesse moyenne que de la brutalité de ses rafales, lesquelles, il est vrai, ont tendance à croître en intensité avec sa force).

Rappelons à ce sujet qu'une rafale, pour être enregistrée comme telle, doit excéder certains seuils minimaux d'écart à la vitesse moyenne et de durée : selon la définition de l'Organisation météorologique mondiale, les rafales de vent doivent être d'au moins 15 nœuds (28 km/h) supérieures à la vitesse moyenne du vent pendant une période d'au moins une minute.

| | |
|--|---------------|
| Quand y a-t-il assez du vent ? | |
| Pour fonctionner avec un minimum d'efficacité, un système éolien exige une vitesse annuelle moyenne de vent d'au moins 4 mètre par second (m/s). | |
| Vitesse moyenne du vent | Régime éolien |
| Jusque 4 m/s (environ 15km/h) | insuffisant |
| 5 m/s (12 km/h) | faible |
| 6 m/s (22 km/h) | modéré |
| 7 m/s 25 km/h) | bon |
| 8 m/s 29 km/h) | excellent |

Tableau 3: correspondances entre vitesse moyenne du vent et régime éolien

I.8) UTILISABILITES DES DONNES DU VENT

Selon la topographie, le vent pourrait varier considérablement dans une région donnée, la présence de forêts, la proximité de la mer ou de bâtiments etc peuvent avoir une influence importante sur le climat éolien local.

Pour cette raison, les statistiques des stations de mesure du vent plus proches du site doivent être utilisées avec discrétion. Comme on indique précédemment, les conditions du vent dans un lieu donné pourraient être très différentes de celles enregistrées par une station qui se trouve à quelques kilomètres de là.

Avant l'installation d'un aérogénérateur, il est nécessaire d'enregistrer les données du vent dans le site prévu pendant un maximum de temps possible.

Une autre ressource importante sont les gens qui vivent dans ou près de l'endroit prévu. Les gens ont souvent une connaissance approfondie sur le comportement du vent à l'endroit où ils vivent!

I.9) LES QUANTITES D'ENERGIES DANS LE VENT

Un des premiers éléments à déterminer, dans l'étude de faisabilité d'un système éolien, c'est la quantité d'énergie éolienne avec laquelle on dispose. Il faut à cet effet mesurer la vitesse du vent pendant une période déterminée, en notant les laps de temps pendant lesquels le vent souffle aux différentes vitesses. On calcule ensuite la vitesse moyenne annuelle du vent. Pour qu'un système éolien présente un intérêt matériel, la vitesse annuelle moyenne doit atteindre 15 km/h minimum. Il est important de connaître identiquement la variation de la vitesse du vent. La vitesse du vent n'est presque jamais nulle et elle ne dépasse que des fois et toujours brièvement le double de sa vitesse annuelle moyenne. La vitesse du vent la plus fréquente est équivalent approximativement à 75 pourcent de sa vitesse annuelle moyenne. Si vous faites appel à un expert pour évaluer la quantité d'énergie éolienne disponible sur votre site, il utilisera probablement un des outils d'évaluation appelé courbe Rayleigh de distribution de la vitesse du vent. Le vent souffle le plus fréquemment à la vitesse correspondant au point le plus élevé de la courbe. Le relief du sol provoque une influence sur la vitesse du vent. Les vallées, les crêtes et les collines peuvent bloquer le vent ou créer des turbulences, conditions qui gênent le bon fonctionnement d'une éolienne. Le frottement, à proximité du sol, ralentit également la vitesse de l'air, qui augmente aussi à mesure qu'on s'éloigne du sol. La vitesse du vent augmente de 12 pourcent chaque fois qu'on double la hauteur du point de mesure dans la plupart des espaces libres ; La quantité d'énergie éolienne disponible augmentera donc si on installe l'éolienne au sommet d'une colline ou sur une tour. Une faible augmentation de la vitesse du vent entraîne une forte augmentation de la quantité d'énergie disponible (comme le phénomène du vent consiste en un déplacement de volumes d'air, la quantité d'énergie contenue dans le vent est proportionnelle au cube de sa vitesse).

I.10) MODELES D'AJUSTEMENT

De par 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.

I.10.1) Distribution de Weibull

Le modèle le plus utilisé pour expliquer la variation des vitesses de vent est la loi de distribution de Weibull. Sa densité de probabilité se présente sous la forme:

$$f(v) = 2 \frac{v}{c^2} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^2\right)$$

En assimilant les fréquences aux probabilités, la densité de probabilité $f(V)$ représente la distribution en fréquences des vitesses mesurées. K et C sont des paramètres appelés communément les paramètres de Weibull. Le paramètre k (facteur de forme) est sans dimension et caractérise la forme de la distribution de fréquence alors que C détermine la qualité du vent (facteur d'échelle). Ce dernier possède la dimension d'une vitesse. La détermination de ces paramètres permet la connaissance de la distribution des vents pour un site donné. Le traitement peut se faire directement ou en passant par les fréquences par classes en considérant les moyennes. La fonction de répartition est donnée par :

$$f(V \leq V_x) = \int_0^{V_x} f(V) dV = 1 - \exp\left(-\left(\frac{V_x}{C}\right)^k\right)$$

$$f(V \geq V_x) = \int_{V_x}^{\infty} f(V) dV = \exp\left(-\left(\frac{V_x}{C}\right)^k\right)$$

I.10.2) Distribution hybride de Weibull

La distribution hybride de Weibull, est utilisée lorsque la fréquence des vents calmes enregistrée, sur un site donné, est supérieure ou égale à 15%. En conséquence, cette proportion ne peut pas être négligée et doit être prise en compte lors de la caractérisation d'un site du point de vue éolien. Cette distribution s'écrit :

$$f(v) = (1 - ff_0) \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \text{ pour } v > 0$$

$$f(v) = ff_0 \quad \text{pour } v < 0$$

Où ff_0 représente la fréquence des vents calmes.

I.10.3) Distribution de Rayleigh

La distribution de Rayleigh est un cas particulier de la distribution de Weibull pour le cas où le facteur de forme k est égal à 2. Sa densité de probabilité est donnée par :

$$f(v) = 2 \frac{v}{c^2} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^2\right)$$

Toutefois la distribution de Weibull classique (fonction de deux paramètres) est la plus indiquée. L'utilisation de ces deux paramètres permet l'évaluation d'un nombre important de propriétés de la distribution, d'où une meilleure caractérisation des sites.

I.10.4) LA LIMITE DE BETZ

Aucun capteur d'énergie éolienne ne peut avoir une efficacité de 100 % par rapport à la puissance cinétique du vent. Cela indiquerait que la vitesse du vent devient nulle à la sortie du capteur et que donc l'air s'y accumulerait. Betz a montré, vers les années 1920, que le meilleur des capteurs, théoriquement, ne pourrait extraire que les 16/27 de la puissance cinétique du vent. Dans le système d'unités utilisé, la puissance maximale récupérable dans le vent devient, pour la condition standard :

$$P (kW) = 0,37 S (m^2) * V^3 (m/s).$$

I.11) CARACTERISTIQUES

La puissance du vent est sensiblement constante à chaque instant pour l'ensemble du globe, en un lieu donné et sur une période solaire, mais elle varie considérablement en tout lieu et suivant les jours. La vitesse du vent est très variable. Le tableau donne, en fonction de sa vitesse, les différents effets que l'on peut constater.

| Effets du vent en fonction de sa vitesse | | | |
|---|------------------------------------|--|---|
| Echelle en Degré Baufort | Nature du vent | Effets physique | Vitesse du vent Moyenn e (m/s) |
| 1 | Vent insensible et très faibles | La fumée monte verticalement (les feuilles semblent immobiles) | 1 |
| | Brisesinfime | Imperceptibles frémissement des feuilles.la fumes est légèrementdéviiée | 2 |

| | | | |
|----|---|--|----|
| 2 | Brise légers (les moulins démarrent) | Les feuilles s'agitent doucement. la fumée est nettement déviée. | 3 |
| 3 | Vent modérés (frais) | Les petits rameaux remuent à peine | 4 |
| 4 | Vent léger | Les branches se plient légèrement | 6 |
| | Brise moyenne bon frais | Les branches se plient nettement | 7 |
| 5 | Fort brise | Les branches oscillent et se balancent | 8 |
| | Grand frais | Les branches se plient | 9 |
| | Tres fortes brises | Les peupliers se plient | 10 |
| 6 | Vent forts | Les feuilles sont arrachées | 12 |
| 7 | Vent tres forts | Les petites branches cassent | 15 |
| 8 | Vent impétueux | Les branches moyennes se brisent | 20 |
| 9 | Fort coup de vent | Débuts des dégâts sur les toitures | 22 |
| 10 | Tempête violente | Les fortes branches cassent | 24 |
| 11 | Tempête violente | Ravages étendus | 30 |
| 12 | Orage | Les toitures sont très endommagées | 36 |
| | Grand orage | Gros arbres et toitures sont arrachés Effets catastrophiques | 46 |

Tableau 4: effets du vent en fonction de sa vitesse

I.11.1) IRREGULARITES SPATIALES

La vitesse du vent est une fonction croissante avec la hauteur au-dessus du sol et avec l'altitude (par rapport au niveau de la mer). La loi de répartition de la vitesse suivant une verticale dépend, d'une part, du relief local et, d'autre part, de la rugosité de la région. Au sommet d'une colline arrondie, on a un accroissement local de vitesse dont l'effet peut inverser le gradient de vitesse habituel et faire que la vitesse au sol soit plus grande qu'à une certaine hauteur.

La figure traduit la répartition de la vitesse du vent en fonction du relief rencontré et de l'altitude.

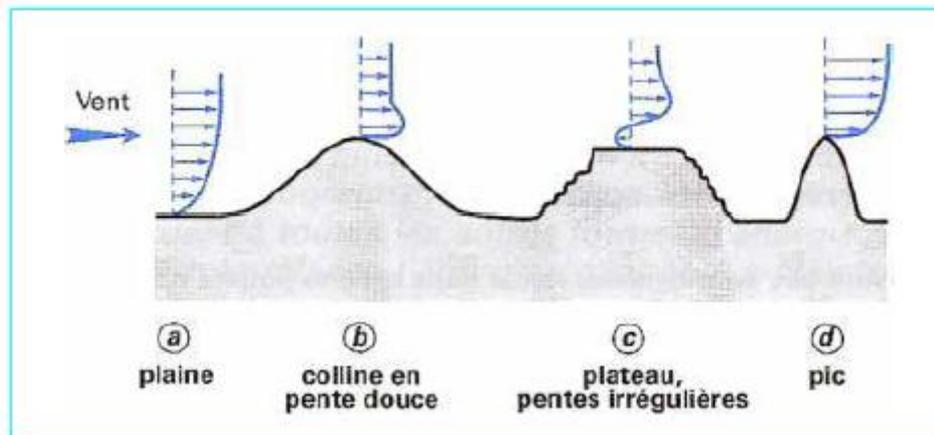


Figure 2: répartition de la vitesse de vent en fonction du relief rencontré et de l'altitude (source : énergies éoliennes)

En terrain plat, on peut représenter la variation de vitesse V en fonction de la hauteur h au-dessus du sol par la loi :

$$\frac{v}{v_0} = \left(\frac{h}{h_0} \right)^\alpha$$

Avec V_0 vitesses à la hauteur h_0 de référence au-dessus du sol,

α Coefficient caractéristique du lieu.

Le coefficient α a sensiblement les valeurs suivantes :

- en mer : $\alpha = 0,13$;
- sur un rivage : $\alpha = 0,16$;
- en plaine : $\alpha = 0,2$;
- en plaine boisée : $\alpha = 0,24$;
- en ville : $\alpha = 0,3$.

I.11.2) IRREGULARITES TEMPORELLE

Le vent change énormément dans le temps. À partir de relevés anémométriques, on trace la courbe vitesse-durée intéressant une période donnée (en général un an) : pour chaque valeur de la vitesse du vent, on détermine le nombre d'heures pendant lesquelles cette vitesse du vent est supérieure ou égale à la vitesse considérée (figure 2a). La caractérisation de ces courbes pourrait faite par la valeur moyenne annuelle quant à une période considérée.

Il est possible aussi d'en déduire la courbe de fréquence (c'est-à-dire la variation inverse de la pente des courbes vitesse-durée) qui indique le nombre d'heures, pour la période considérée, pendant lesquelles la vitesse du vent reste comprise entre des valeurs données (figure 2b). Cette courbe de fréquence donne une idée de la régularité du vent en un lieu donné.

Les irrégularités sont maximales à l'échelle du mois. En moyenne, la répartition saisonnière est approximativement sinusoïdale. Les variations de courte durée ont des causes locales.

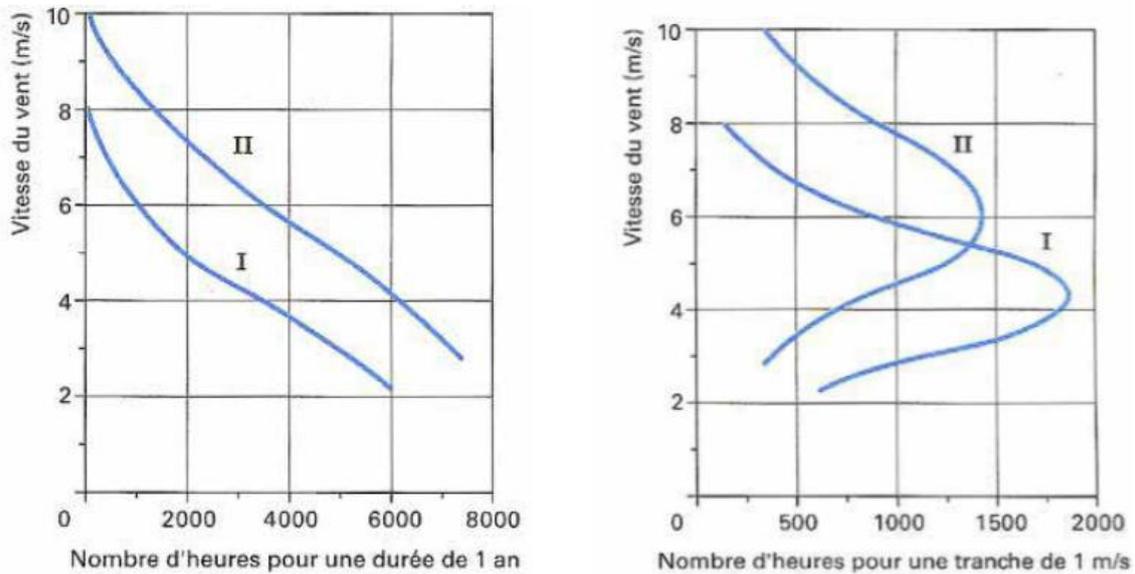


Figure 3: Exemple d'irrégularités temporelles du vent (source : livre énergies éoliennes)

I.11.3) ENERGIES DU VENT RECUPEERABLE

L'énergie du vent est l'énergie cinétique de l'air qui traverse une certaine surface S . La puissance W est donc :

$$\dot{W} = \frac{1}{2} \rho v^2 S v = \frac{1}{2} \rho S v^3$$

Avec ρ masse volumique de l'air ($\rho \approx 1,25 \text{ kg/m}^3$ dans les conditions normales de température et de pression au niveau de la mer). La puissance varie donc comme le cube de la vitesse V du vent.

Partie II) L'EOLIENNE

II.1) L'énergie éolienne

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le refroidissement de certaines zones de la planète et le réchauffement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers. Dans l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an. Selon le Global Wind Energy Council (GWEC), le parc éolien pourrait atteindre une puissance installée de 230 GW en 2020, soit plus de 5 fois la puissance installée en 2005 qui était de 40 GW. Le principal inconvénient de cette source d'énergie est l'indisponibilité et l'imprévisibilité du vent.

II.1.1) Différents types d'aérogénérateurs

Il existe deux grandes catégories d'éoliennes selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice :

- les turbines éoliennes à axe horizontal
- les turbines éoliennes à axe vertical

II.1.1.1) Les turbines éoliennes axe horizontale et à axe verticale

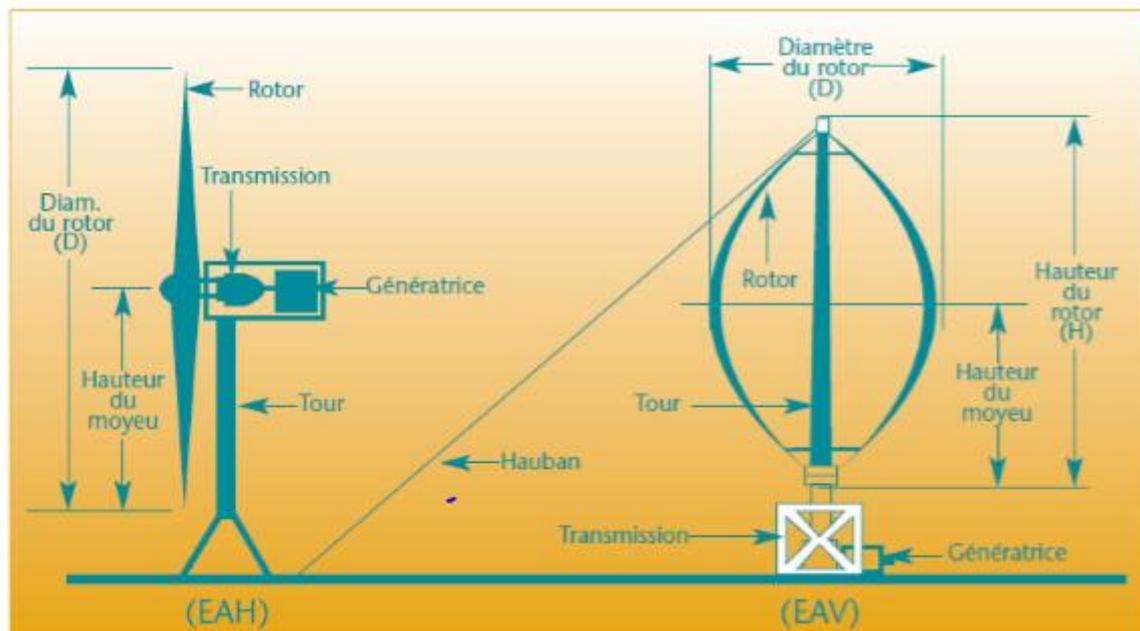


Figure 4: Les éoliennes à axes horizontale (EAH) et à axe verticale (EAV)

II.1.1.2) Le rotor

Le rotor est constitué de plusieurs pales qui possèdent une forme particulière et un profil aérodynamique particulier. Quand le vent fait tourner les pales, celles-ci font tourner le rotor qui fait tourner le mécanisme d'entraînement et le générateur. Les pales doivent être solides

légères, et durables, pour résister à l'action des éléments. On les construit couramment en matériaux composites à base de fibre de verre, en plastique renforcé ou en bois. L'éolienne doit aussi être conçue de manière à ce que, pour le vent fort, le rotor ne tourne pas trop vite. C'est le diamètre des pales qui détermine la quantité d'électricité créée par le système. L'éolienne compte couramment deux ou trois pales. Le rotor à trois pales minimise les contraintes mécaniques que subit le système, or son coût est plus élevé.

II.1.1.3) Le générateur/alternateur

Les générateurs et les alternateurs fournissent de l'électricité grâce à la rotation des pales de l'éolienne. Le générateur produit du courant continu et l'alternateur, du courant alternatif. La plupart des éoliennes utilisées pour alimenter des chargeurs de batteries utilisent des alternateurs, et on convertit le courant alternatif en courant continu, pour charger les batteries.

II.1.1.4) La boîte d'engrenages

La plupart des éoliennes, en particulier celles d'une puissance supérieure à 10 kW, sont équipés d'une boîte d'engrenages qui permet d'adapter la vitesse de rotation du rotor à celle du générateur. Mais dans la plupart des mini-systèmes, le générateur/alternateur et le rotor tourne à la même vitesse, et l'utilisation d'une boîte d'engrenages est superflue.

II.1.1.5) La nacelle

La nacelle est l'enveloppe qui protège la boîte d'engrenages, le générateur et les autres composants contre l'action des éléments. Elle est amovible pour permettre l'entretien de l'éolienne.

II.1.1.6) L'empennage (mécanisme à lacet)

Un mécanisme à lacet maintient l'éolienne à axe horizontal dans la ligne du vent. La majorité des micro-systèmes et des mini-systèmes utilisent un simple empennage qui place l'axe parallèlement à la direction du vent. Dans certains systèmes, le rotor se trouve en aval du générateur, par rapport au vent, et il s'aligne donc automatiquement.

Pour garantir la régulation de la puissance et de la vitesse du rotor, d'autres systèmes sont munis d'un mécanisme à lacet qu'on peut décaler par rapport à l'axe vertical. Des mécanismes spéciaux de déverrouillage assurent de se servir du système à lacet pour faire tourner les éoliennes à axe horizontal et les sortir de l'influence des vents forts lorsqu'ils risquent de les endommager.

II.1.1.7) Systèmes de contrôle et de protection

Les différents systèmes de contrôle vont du simple interrupteur, aux fusibles et aux régulateurs de charge des batteries, et aux systèmes informatisés qui contrôlent les systèmes à lacet et les freins. Le degré de perfectionnement du système de contrôle et de protection de l'application considérée de l'éolienne et du système énergétique qu'elle alimente. Il est

important de connaître certains termes clés utilisés dans les descriptions et les spécifications des éoliennes. Le tableau suivant contient les termes que l'on trouve le plus souvent dans la documentation du fabricant concernant les différents types de mini-système engendrant du courant continu.

| Spécifications | Exemples de données | Importance | Unités |
|--------------------------|---------------------|--|---|
| Puissance nominale | 600 W | Puissance de sortie maximale (calculée normalement pour des vitesses de vent de 12 à 15 m/s, c.-à-d. de 40 à 50 km/h), utilisée pour déterminer la dimension des fils et des éléments de contrôle en fonction du courant maximal qui les traversera. | watts ou kW |
| Vitesse nominale du vent | 40 km/h | Vitesse du vent à laquelle l'éolienne produit sa puissance nominale. | kilomètres/heure (km/h) mètres/seconde (m/s) |
| Tension de sortie | 12 ou 24 volts c.c. | Détermine le type d'équipement qui sera utilisé. | le courant peut être continu ou alternatif |
| Vitesse d'enclenchement | 11 km/h | Vitesse du vent à laquelle l'éolienne commence à produire de l'électricité. | kilomètres/heure (km/h) ou mètres/seconde (m/s) |
| Vitesse de déclenchement | 45 km/h | Vitesse du vent à laquelle l'éolienne cesse de produire de l'électricité parce qu'elle se détourne du vent ou parce qu'elle s'arrête pour ne pas être endommagée. | kilomètres/heure (km/h) ou mètres/seconde (m/s) |
| Diamètre des pales | 2,5 m | Diamètre hors-tout des pales, un facteur déterminant de la puissance produite. | mètres (m) |
| Nombre de pales | 3 | Les éoliennes ont le plus souvent trois pales, mais elles peuvent en avoir deux ou quatre. | |
| Poids du système | 20 kg | Poids des pales et du générateur/alternateur qu'il faut installer au sommet de la tour. | kilogrammes (kg) |
| Courbe de puissance | s/o | Graphique représentant la puissance de sortie en fonction de la vitesse du vent; il faut s'en servir pour estimer la production d'énergie de l'éolienne. | Puissance en watts et vitesse du vent en mètres/seconde (m/s) |
| Période de garantie | 2 ans | Normalement de un à trois ans | année |

| Spécifications | Exemples de données | Importance | Unités |
|--------------------------|---------------------|--|---|
| Puissance nominale | 600 W | Puissance de sortie maximale (calculée normalement pour des vitesses de vent de 12 à 15 m/s, c.-à-d. de 40 à 50 km/h), utilisée pour déterminer la dimension des fils et des éléments de contrôle en fonction du courant maximal qui les traversera. | watts ou kW |
| Vitesse nominale du vent | 40 km/h | Vitesse du vent à laquelle l'éolienne produit sa puissance nominale. | kilomètres/heure (km/h) mètres/seconde (m/s) |
| Tension de sortie | 12 ou 24 volts c.c. | Détermine le type d'équipement qui sera utilisé. | le courant peut être continu ou alternatif |
| Vitesse d'enclenchement | 11 km/h | Vitesse du vent à laquelle l'éolienne commence à produire de l'électricité. | kilomètres/heure (km/h) ou mètres/seconde (m/s) |
| Vitesse de déclenchement | 45 km/h | Vitesse du vent à laquelle l'éolienne cesse de produire de l'électricité parce qu'elle se détourne du vent ou parce qu'elle s'arrête pour ne pas être endommagée. | kilomètres/heure (km/h) ou mètres/seconde (m/s) |
| Diamètre des pales | 2,5 m | Diamètre hors-tout des pales, un facteur déterminant de la puissance produite. | mètres (m) |
| Nombre de pales | 3 | Les éoliennes ont le plus souvent trois pales, mais elles peuvent en avoir deux ou quatre. | |
| Poids du système | 20 kg | Poids des pales et du générateur/alternateur qu'il faut installer au sommet de la tour. | kilogrammes (kg) |
| Courbe de puissance | s/o | Graphique représentant la puissance de sortie en fonction de la vitesse du vent; il faut s'en servir pour estimer la production d'énergie de l'éolienne. | Puissance en watts et vitesse du vent en mètres/seconde (m/s) |
| Période de garantie | 2 ans | Normalement de un à trois ans | année |

Tableau 5: documentation du fabricant concernant les différents types de mini-système engendrant du courant continu.

II.1.1.8) Tours

La tour supporte l'éolienne et fait donc partie intégrante du système. Son rôle est de porter le système et il faut s'assurer qu'elle est capable de le faire. Elle doit résister aux coups de foudre, aux vents les plus violents, à la grêle et à la formation de glace. On ne peut pas utiliser que les tours agréées par les fabricants d'éoliennes, sinon la garantie du fabricant de l'éolienne risque de ne pas être valable. Il existe différents types de tours : Les tours haubanées sont économiques et très résistantes, si elles sont bien installées. L'ancrage adéquat des haubans nécessite un espace suffisant à la base de la tour. Les fondations en béton de la tour doivent être assez profondes pour résister aux efforts maximum de traction des câbles. Leur profondeur doit dépasser celle du gel; les zones sablonneuses ou mal drainées risquent de créer des problèmes.

II.1.1.9) Hauteur de la tour

Tandis que la force du vent accroisse et que l'écoulement du vent devient moins turbulent en fonction de la hauteur, et comme la puissance de sortie de l'éolienne augmente

sensiblement en fonction de la vitesse du vent, si on augmente la hauteur de la tour de 10 à 50 mètres on peut doubler la quantité d'énergie éolienne disponible.

II.1.1.10) Batteries

On équipe un grand nombre de systèmes éoliens de batteries qui fabriquent de l'électricité de remplacement quand le vent n'est pas favorable. Un système sans batteries produira de l'électricité lorsque le vent soufflera assez fort pour répondre à la demande.

II.1.1.11) Onduleurs

L'énergie stockée dans les batteries est disponible sous forme de courant continu. Certains appareils sont conçus pour être alimentés en courant continu ; c'est le cas des appareils de l'équipement utilisés dans le matériel de camping, d'éclairage, de navigation de plaisance et dans les véhicules récréatifs, parce qu'ils sont fabriqués au départ pour être alimentés par batterie. Mais les appareils électroménagers que nous utilisons 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 10 pourcent. 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.

II.1.1.12) Organes capteurs

L'organe capteur prélève l'énergie cinétique du vent pour la transformer en énergie utilisable, mécanique ou électrique. C'est l'organe le plus important et il en possède de nombreux types.

II.1.1.13) Différents types de capteurs

Le tableau ci-dessous en donne une classification méthodique et précise les principales caractéristiques des capteurs. À partir de ces modèles élémentaires, de nombreux autres capteurs peuvent être imaginés par jonction de plusieurs de ces modèles élémentaires. Toutefois, seul le nom qui est indiqué en gras dans le tableau présente un réel intérêt et font l'objet d'applications.

Le coefficient S_c/S_v d'utilisation d'aubage est le rapport de l'aire développée par l'ensemble de l'aubage à l'aire de la veine d'air interceptée, donc motrice. Plus ce coefficient est petit, plus le capteur est intéressant sur le plan économique. Le paramètre de vitesse $\lambda = U/V$ est le rapport de la vitesse maximale de déplacement de l'aubage U à la vitesse du vent V ,

avec $U = \omega/R$. De fortes valeurs du paramètre λ (jusqu'à 20) permettent un meilleur rendement et de meilleures possibilités d'utilisation.

Les capteurs qui n'ont pas besoin d'être orientés, et d'axe vertical, sont aussi appelés anémones (à tout vent). Les capteurs dynamiques ou rotors sont de très loin les plus développés; les capteurs statiques ne sont que des élaborations théoriques. Les capteurs dynamiques changent l'écoulement de l'air qui les traverse et se trouvent soumis à sa réaction. Cette réaction peut être réduite à une force résultante et à un couple. Cette force peut être divisée en :

- une poussée perpendiculaire au vent relatif ou Portance ;
- une réaction parallèle au vent relatif ou Traînée

On définit aussi la circulation Γ d'un profil C par :

$$\Gamma = \int_C v dS$$

Cette circulation peut varier soit périodiquement, l'écoulement est alors *instationnaire*, soit être constante, l'écoulement est alors *stationnaire*.

La force de portance F_z d'une surface S est donnée par la relation :

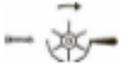
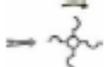
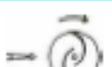
$$F_z = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_z$$

De même, la force de traînée F_x est égale à :

$$F_x = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_x$$

La portance ne dégrade pas l'énergie, tandis que la traînée résulte en partie de cette dégradation. Les machines à traînées (tableau 2) sont irrationnelles ; seul le rotor de Savonius possède un certain intérêt du fait d'ailleurs qu'il n'utilise pas seulement la différence de traînée. Les capteurs à circulation instationnaire, dont la théorie est compliquée, ont reçu qu'il y a une dizaine d'années un développement important qui en faisant des concurrents directs des capteurs à circulation stationnaire, seuls utilisés pratiquement depuis longtemps.

Seuls seront décrits ci-après, les deux capteurs à axe horizontal actuellement les plus répandus et les capteurs à axe vertical, mais le développement s'est réduit. Les capteurs statiques ne font l'objet d'aucune recherche en cours, donc ne seront pas étudiés en détail ici

| Types de capteurs | | Schéma | Sens de l'axe | Ori-entation | S_x/S_y | λ | Caractéristiques principales |
|--|--------------------------------|--|---------------|--------------|-----------|-----------|--|
| Axe horizontal à circulation anticyclonique | type américain |  | horizontal | oui | 0,9 à 1,5 | 0,9 à 1,5 | — capteur rustique mais pas très simple, — couple au démarrage élevé, surtout pour le pompage de l'eau. |
| | moulin à hélice |  | horizontal | oui | 0,1 à 0,3 | 5 à 12 | — capteur simple, réglage facile, — bon rendement, vitesse élevée mais couple au démarrage faible. |
| Axe vertical à transmission différentielle | à écran |  | vertical | oui | 3 à 5 | 0,2 à 0,6 | — double dispositif (écran) lourd, — prise au vent élevée. |
| | à clapet battant |  | vertical | non | 2 à 5 | 0,2 à 0,6 | — capteur bruyant, — usure importante, — bonne utilisation du vent. |
| | orientation cyclique des aubes |  | vertical | oui | 2 à 4 | 0,2 à 0,6 | — capteur compliqué, — usure importante. |
| | moulinet |  | vertical | non | 5 | 0,3 à 0,8 | — capteur simple, — capteur utilisé uniquement pour la mesure de vitesse. |
| | flux transversal |  | vertical | non | 6 à 10 | 0,3 à 0,4 | — capteur fiable, — prise au vent élevée. |
| | rotor de Savonius |  | vertical | non | 1,2 à 1,6 | 0,9 à 1,7 | — capteur simple, — démarrage à faible vitesse et couple élevé. |

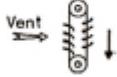
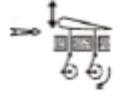
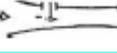
| Tableau 2 – Types de capteurs classification et caractéristiques (suite) | | | | | | | | |
|--|---|--|---|------------------------|-----------|-----------|------------------------------|--|
| Types de capteurs | | Schéma | Sens de l'axe | Ori-entation | S_c/S_v | λ | Caractéristiques principales | |
| CAPTEURS DYNAMIQUES | Axe vertical ou horizontal à circulation instantanée | tapis roulant |  | vertical ou horizontal | oui | 2 à 4 | 1 à 2 | — capteur compliqué, — capteur peu fiable et coûteux. |
| | | profil oscillant |  | vertical ou horizontal | oui | 2 | 0,5 à 1 | — capteur compliqué, — capteur coûteux. |
| | | train de rotors Magnus |  | vertical | oui | 1,5 à 4 | 1 | — capteur compliqué, — sous forme élémentaire et appliqué à la navigation. |
| | | variation cyclique et aubes fixes (Darrieus) |  | vertical | non | 0,1 à 0,3 | 3 à 8 | — capteur très simple, fiable et peu coûteux, — couple au démarrage très faible. |
| | | variation cyclique et aubes mobiles |  | vertical | oui | 0,2 à 0,6 | 3 à 8 | — capteur compliqué, — usure importante, — capteur assez coûteux, avec un bon rendement. |
| CAPTEURS STATIQUES | | à variation de pression |  | | oui | 5 à 8 | | — capteur simple et fiable, — hauteur d'aspiration faible. |
| | | à convertisseur électrostatique |  | | oui | 5 à 8 | | — capteur simple en théorie, — pas de développement actuel. |

Tableau 6: type des capteurs, classification et caractéristique. (Source : énergies éoliennes)

II.2) Les potentiels en ressources d'énergies renouvelables à Madagascar

Plusieurs rapports, études et autres travaux de mémoire confirment que Madagascar est généreusement bien nanti en termes de ressources énergétiques et particulièrement en énergies renouvelables.

Que ce soient l'irradiation solaire pour l'énergie solaire, les cours d'eau pour l'énergie hydraulique, le vent pour l'énergie éolienne, ainsi que les surfaces exploitables pour les bioénergies, Madagascar dispose de la quantité et la qualité suffisante pour s'auto suffire énergétiquement.

Pourtant, l'exploitation de ces ressources tarde à se réaliser. Les potentiels de Madagascar en ressources d'énergies renouvelables sont résumés comme suit:

II.2.1) L'énergie Solaire:

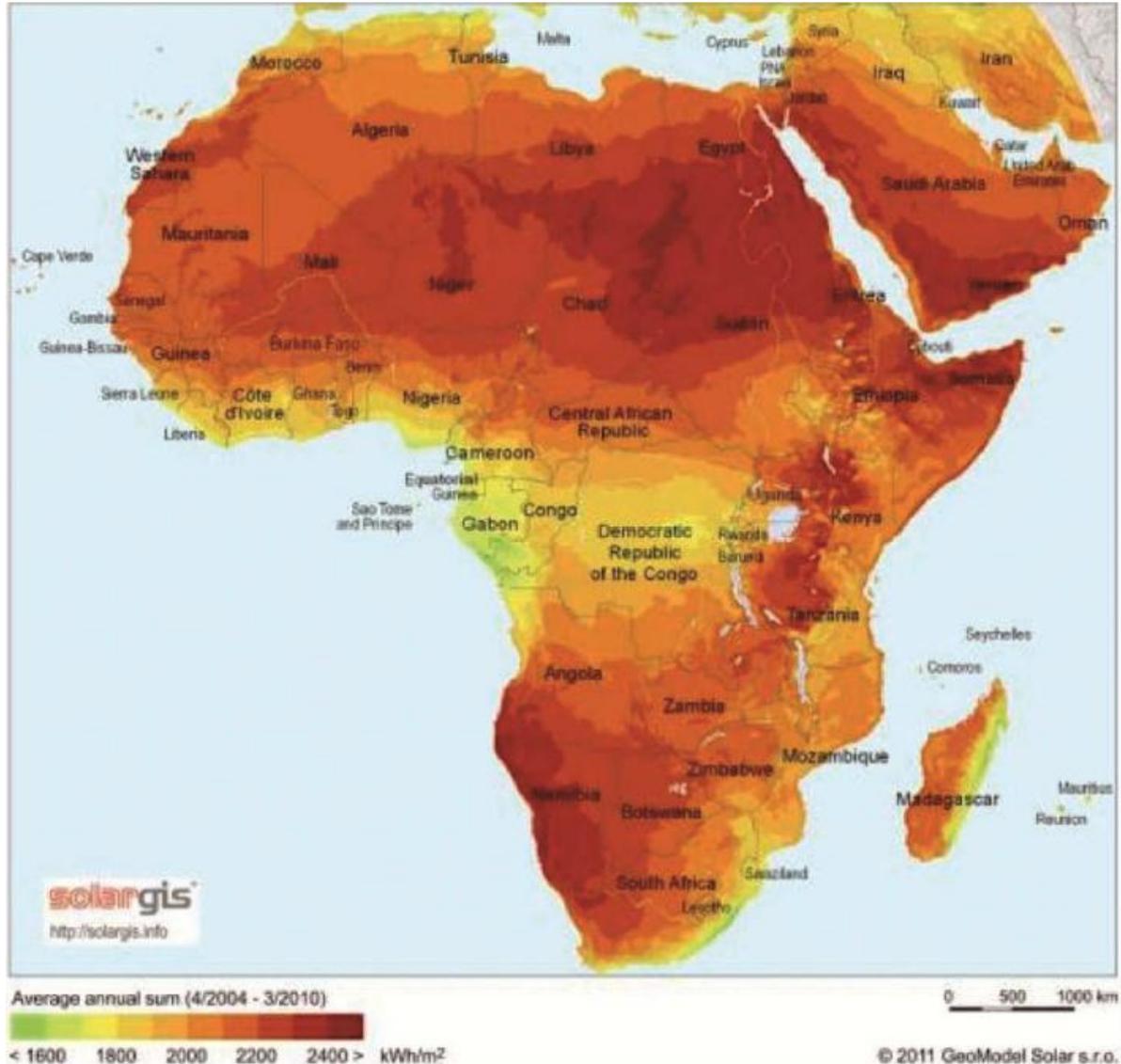


Figure 5: Carte d'irradiation moyenne annuelle de l'Afrique Source : Rapport de diagnostic du Secteur Energie (Cabinet AIDES – 2012)

D'après cette carte et selon les différentes études réalisées auparavant, Madagascar possède d'un important potentiel en Energie solaire avec une Energie incidente de l'ordre de 2 000 kWh/m²/an. Presque toutes les régions du pays ont plus de 2 800 heures d'ensoleillement par an. Les régions les plus intéressantes disposant d'un niveau de rayonnement supérieur à 5 500 W/m² sont : Diana, Sava, Sofia, Boeny, Melaky, Menabe, Haute Matsiatra, Amoron'i Mania, Anosy, Androy, Atsimo Andrefana, Vakinankaratra, Bongolava, Atsimo Atsinanana. L'Energie solaire est qualifiée en Energie électrique grâce aux installations photovoltaïques.

Malgré les potentiels existants, ces ressources restent encore sous-exploitées. Leur valorisation reste très restreinte, au niveau des CSB, antennes relais des opérateurs dans les télécommunications, postes avancés de la gendarmerie, écoles et particuliers.

Pour la JIRAMA, un seul centre thermique solaire de 7 kW a été mis en service à Benenitra depuis l'année 2001. Ce centre fonctionne en appoint avec un thermique diesel.

II.2.2) Le solaire photovoltaïque

Les installations photovoltaïques (panneaux, convertisseurs) restent encore entièrement importées. Cela se traduit par des prix assez élevés, qui constituent couramment les principaux facteurs de blocage pour l'utilisation de cette technologie.

Les batteries sont, dans la majorité des cas, importées mais on peut utiliser aussi la batterie du fabricant local Virio.

Différentes options et capacités sont offertes par plus d'une vingtaine de fournisseurs sur le marché.

Ces sociétés proposent différentes gammes de panneaux solaires, conseillent et apportent une assistance technique aux futurs utilisateurs.

Les fournisseurs vendent surtout les panneaux et les accessoires. Ils donnent en option les batteries car les clients peuvent choisir d'autres batteries sur le marché.

Un aperçu des prix d'achat des installations solaires est présenté à titre indicatif ci-après:

- Panneaux photovoltaïques silice amorphe de 50 Wc : 700 000 Ar
- Panneaux photovoltaïques de 50 Wc : 1 000 000 Ar
- Batteries de 50 A : à partir de 250 000 Ar
- Régulateur : à partir de 170 000 Ar

II.2.2.1) Le solaire à concentration et cuiseur solaire

Les cuiseurs solaires proposés sur le marché malgache sont les fours solaires et les paraboles. Ils sont fabriqués localement à partir des matériaux métalliques importés (éléments métalliques réfléchissants, barre de fer pour l'ossature). Un four solaire est une caisse isolée à l'intérieur de laquelle la température peut monter jusqu'à 150° C. 100 fours solaires économisent 720 tonnes de bois de chauffage et une surface de 130 ha de forêts.

Ces fours solaires ont été vendus à plusieurs milliers d'unités dans le Sud.

II.2.3) L'Energie Hydraulique:

Le potentiel hydraulique à Madagascar est estimé à 7 800 MW, or une part infime de l'ordre de 2,5% de cette ressource est actuellement exploitée. La construction de la Centrale Hydroélectrique d'Andekaleka, qui remonte en 1982 a été le dernier grand investissement de la JIRAMA en termes de barrage. C'est la plus grande centrale hydroélectrique de Madagascar qui fait tourner deux turbines de 29 MW chacune. Une troisième turbine y a été ajoutée et mise en service courant de l'année 2012 avec une puissance nominale de 33 MW. L'installation de

cette turbine a été financée conjointement par le groupement de banques Arabes (KFAED, BADEA, OFID) et le Gouvernement Malagasy.

L'installation d'une quatrième turbine a été prévue concomitamment avec celle de la troisième mais la BEI a suspendu son financement à cause des évènements sociopolitiques survenus à Madagascar en 2009.

Deux centrales hydroélectriques privées ont renforcé la production hydroélectrique de la JIRAMA, en mode IPP, à savoir :

- La centrale hydroélectrique de Sahanivotry, exploitée par la Société HYDELEC, d'une puissance nominale de 16 000 kW, mise en service en octobre 2008 ;

- La centrale hydroélectrique de Tsiazompaniry, exploitée par la Société Henri Fraise et Fils, d'une puissance de 5400 kW, mise en service le 16 juin 2010.

Ces deux centrales injectent leurs productions dans les réseaux interconnectés d'Antananarivo (RIA) en renfort aux centrales de la JIRAMA.

Ci-dessous des tableaux montrant la part de l'hydroélectricité dans le mix électrique de Madagascar :

Production de la JIRAMA entre Janvier et Juillet 2013 : (source : JIRAMA/DPS)

| Mode de Production JIRAMA+ PRIVES | Production en kWh | % |
|--|--------------------------|------------|
| Thermiques (dont 62,2% JIRAMA) | 336 757 427 | 41 |
| Hydroélectricité (dont 89,38% JIRAMA) | 484 556 799 | 59 |
| Solaire (100% JIRAMA) | 4 081 | 00 |
| TOTAL | 821 318 307 | 100 |

Tableau 7: Production de la JIRAMA entre Janvier et Juillet 2013 : (Source : JIRAMA/DPS)

Puissance installée pour l'électrification rurale (Réalisation de 2004 à 2012)(Source ADER)

| Mode de Production | Puissance Installée en kW | % |
|---------------------------|----------------------------------|----------|
| Groupe électrogène | 3 159 | 75,20 |
| Hydroélectricité | 788 | 18,80 |
| Eolienne | 145 | 3,50 |

| | | |
|-------------------|--------------|------------|
| Biomasse, Bagasse | 94 | 2,20 |
| Solaire | 14 | 0,30 |
| TOTAL | 4 200 | 100 |

Tableau 8: Puissance installée pour l'électrification rurale (Réalisation de 2004 à 2012) (Source ADER)

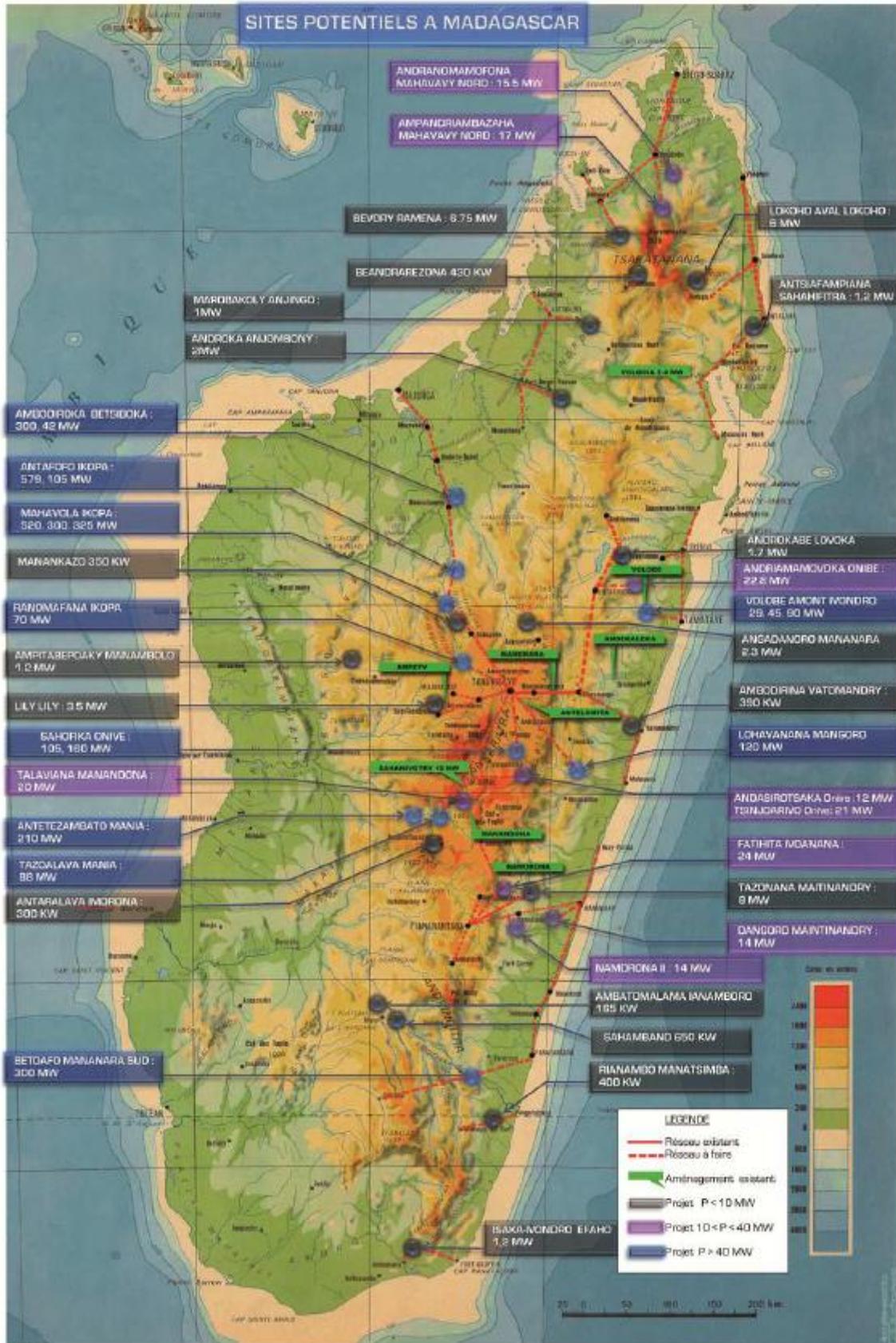


Figure 6 : Source: JIRAMA - Direction de l'Equipeement Electricité

II.2.4) La Biomasse (bioénergies):

Le domaine des bioénergies à Madagascar est très actif. Il s'agit surtout du bioéthanol par canne à sucre et huile végétale qui pourrait se substituer à l'essence pour les moteurs ou en tant que combustible pour la cuisson domestique, et du biodiesel par *Jatropha curcas* qui peut être transformé pour alimenter les moteurs également. Par ailleurs, l'huile brute de *Jatropha* peut être utilisée comme combustible pour éclairage ménager ou comme combustible pour la cuisson. De nombreux acteurs nationaux et internationaux s'engagent dans divers projets, entre autres, dans les régions de Diana, Boeny, Menabe, Alaotra Mangoro, Atsinanana, Amoron'i Mania, Vatovavy Fitovinany pour le bioéthanol, et Atsimo andrefana, Boeny, Diana, Haute Matsiatra, Ihorombe pour le *Jatropha*.

Par contre, le biogaz est peu utilisé à Madagascar, malgré son grand potentiel en jacinthes d'eau dans le Canal des Pangalanes, et ses réserves en déchets urbains ou d'abattoirs. Il n'y a pas assez d'expérience de production d'électricité par biogaz.

L'électrification rurale décentralisée par biomasse (bois, déchets de transformation du bois, rafles de maïs, balles de riz) est par contre expérimentée dans les régions Alaotra-Mangoro, Anosy, Boeny, et dans la Haute Matsiatra.

Partie III) Le gisement éolien proprement dite

III.1) Présentation du logiciel de calcul utilisé: RETScreen4.

III.1.1) Brève description

RETScreen® International est à la fois un outil de sensibilisation aux énergies propres, d'aide à la décision et de renforcement des compétences. L'outil consiste en un logiciel standardisé et intégré d'analyse de projets d'énergies propres qui peut être utilisé partout dans le monde pour évaluer la production énergétique, les coûts du cycle de vie et les réductions d'émissions de gaz à effet de serre pour différentes technologies d'efficacité énergétique et d'énergie renouvelable. Chaque modèle de technologie d'énergie propre RETScreen (p. ex.

projet de centrale éolienne, etc.) a été développé dans un classeur Microsoft® Excel individuel. Chaque classeur est ensuite composé d'une série de feuilles de calcul. Ces feuilles de calcul ont un aspect commun et suivent une démarche standardisée, commune à tous les modèles RETScreen. En plus du logiciel, l'outil comprend des bases de données (produits, coûts et données météorologiques), un manuel en ligne, un site Web, un manuel d'ingénierie, des études de cas et un cours de formation.

III.1.2) Organigramme

Compléter chaque feuille de calcul ligne par ligne de haut en bas en entrant des valeurs à l'intérieur des cellules de couleur. Pour se déplacer entre les feuilles de calcul, il suffit de cliquer sur les onglets du classeur au bas de l'écran ou de sélectionner les hyperliens (bleus et soulignés) se trouvant dans les feuilles de calcul. L'organigramme du modèle RETScreen est présent ci-dessous.

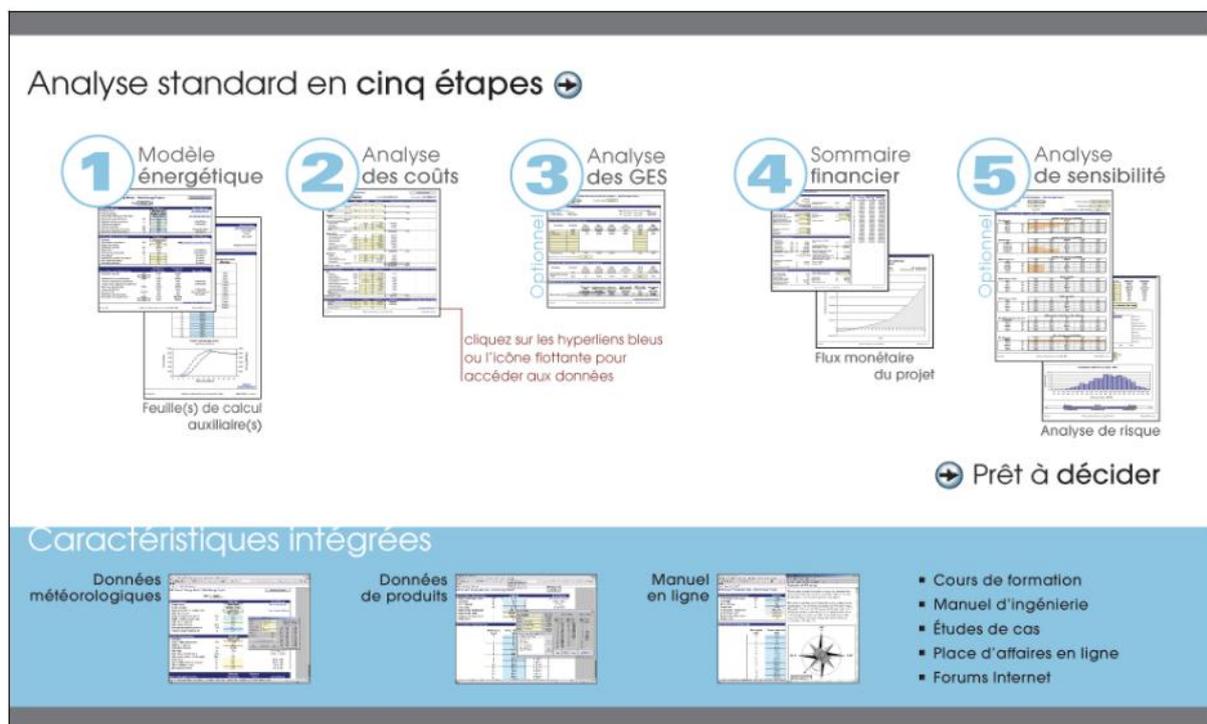


Figure 7: Organigramme du modèle RETScreen

III.1.3) Modèle pour projets de centrale éolienne

Le modèle RETScreen® International pour projets de centrale éolienne permet d'évaluer la production d'énergie, la viabilité financière et les réductions d'émissions de gaz à effet de serre pour des projets de centrale éolienne hors réseau ou raccordés à un réseau isolé ou à un réseau central d'électricité, et ce partout à travers le monde.

Le modèle RETScreen pour projets de centrale éolienne contient six feuilles de calcul :Modèle énergétique, Caractéristiques des équipements (Équipements), Analyse des coûts, Analyse des réductions d'émissions de gaz à effet de serre (Analyse des GES), Sommaire financier et Analyse de sensibilité et de risque (Sensibilité).

Les feuilles de calcul sont remplies dans l'ordre suivant : Modèle énergétique, Équipements, Analyse des coûts et Sommaire financier. Les feuilles de calcul Analyse des GES et Sensibilité sont des analyses optionnelles. La feuille de calcul Analyse des GES est fournie pour aider l'utilisateur à évaluer l'atténuation potentielle de gaz à effet de serre engendrée par le projet proposé. La feuille de calcul Sensibilité est fournie pour aider l'utilisateur à évaluer la sensibilité de certains indicateurs financiers aux paramètres techniques et financiers importants du projet. En général, les feuilles de calcul sont remplies du haut en bas et le processus peut être répété aussi souvent que nécessaire pour optimiser la conception du projet au niveau des coûts et de l'utilisation de l'énergie.

III.1.4) L'énergie éolienne à Madagascar

Actuellement, le taux d'accès à l'électricité à Madagascar reste toujours, parmi les plus faibles du monde. 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. Certaines installations de production sont saturées et sont très vulnérables aux intempéries malgré la richesse en ressources d'énergie renouvelable peu exploitées du pays. Cette situation constitue un handicap au développement de Madagascar. Par ailleurs, depuis quelques années, la progression de l'électrification du pays reste faible et la situation est particulièrement prégnante dans les zones rurales où le taux d'accès à l'électricité est inférieur à 2%. Cette situation place donc l'Electrification Rurale au rang de priorité nationale dans le processus de développement économique et social du pays, avec comme principaux objectifs :

- améliorer les conditions de vie de la population rurale,
- contribuer à la stabilisation de la population rurale sur leur lieu d'habitat traditionnel,
- participer au développement économique en fournissant les moyens de produire et créer de la richesse,

- protéger l'environnement par l'utilisation de machines respectant des standards modernes et/ou l'utilisation des énergies renouvelables.

La Société d'Etat JIRAMA assure le service public d'électricité et dessert à la fin 2000, 295.357 abonnés sur tout le territoire national. Entre 1986 et 1996, le nombre d'abonnés avait augmenté au rythme moyen de 4,5 % par an. Ce rythme s'est nettement accéléré entre 1996 et 2000, période durant laquelle le nombre d'abonnés a augmenté en moyenne de 7,9 % par an (78.000 abonnés supplémentaires). Le taux de croissance de la demande escomptée pour les 10 prochaines années est de 7 % par an. Les ressources financières très limitées du secteur public ne sont pas en mesure de répondre à cette demande.

Le système électrique national est composé des réseaux interconnectés d'Antananarivo et de Fianarantsoa et de centres autonomes. Les 70% de l'énergie électrique produite sont assurés par des centrales hydroélectriques et le reste par des centrales thermiques. La puissance totale installée est actuellement de l'ordre de 233MW. Par ailleurs, le réseau interconnecté d'Antananarivo, avec une pointe de 111 MW en 2000, est actuellement au bout de sa capacité. Pour éviter l'important risque de défaillance qui pèse sur le système interconnecté d'Antananarivo, il est nécessaire de développer rapidement le parc de production et de mettre en place une structure adéquate de transport et de distribution électrique. Ces besoins sont très importants et ne peuvent, de manière réaliste, être satisfaits par le seul secteur public.

III.1.5) Carte du vent à madagascar

Voici une carte de vent établie par l'ADER qui donne la vitesse moyenne du vent par fonkotany mesurer à 10 metre du sol .

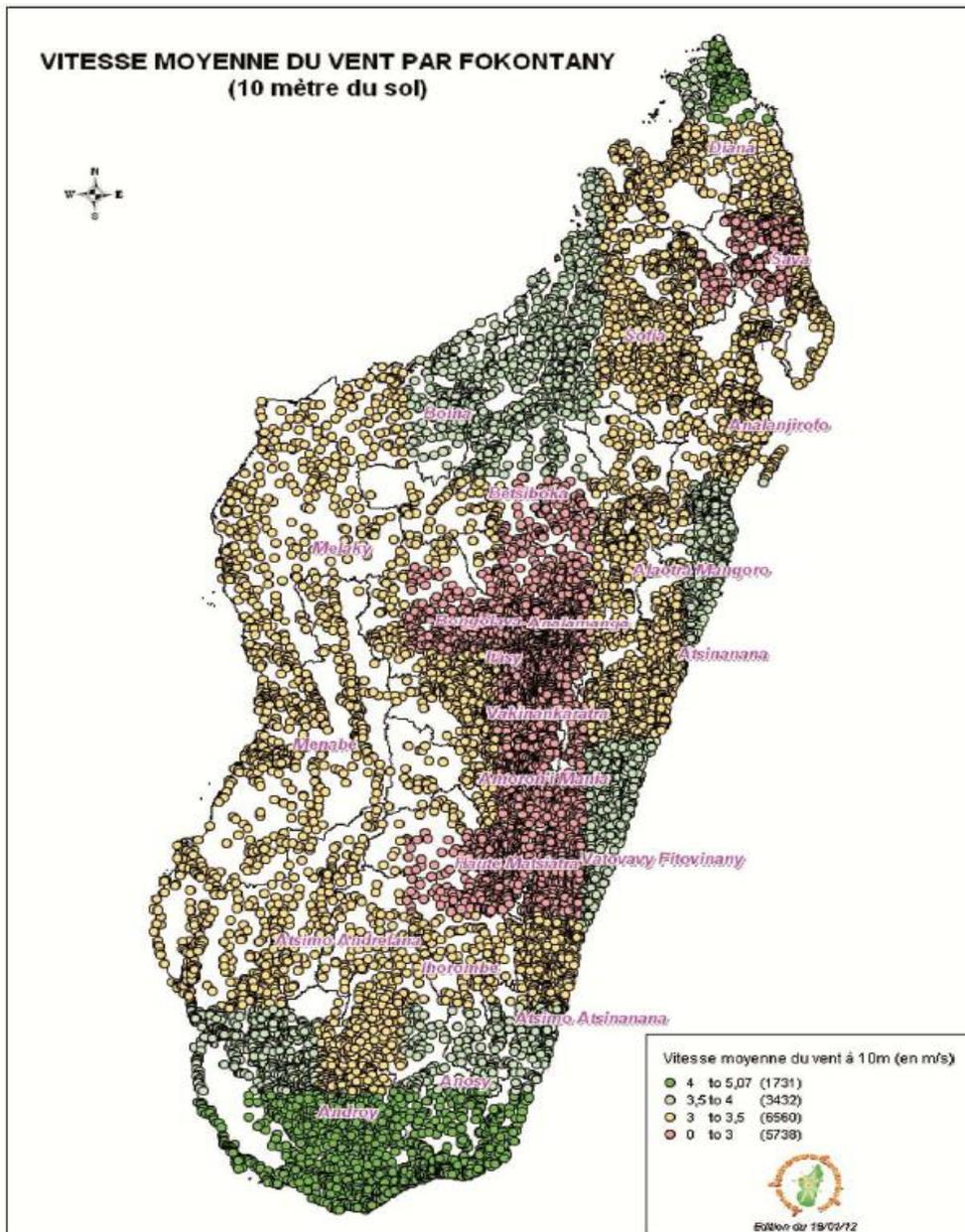


Figure 8: vitesse moyenne du vent par Fokontany Source : ADER

D'après cette carte, on constate que seules les parties des hauts-plateaux, qui bénéficient généralement de l'électricité des réseaux interconnectés de la JIRAMA, ont des vitesses de vent inférieures à 3m/s à 10 m du sol. Il est à rappeler que les seuils opérationnels des vitesses du vent pour les énergies éoliennes se situent entre 4m/s et 25m/s. Madagascar possède un potentiel important en matière de production d'Énergie éolienne. Il y a 3 sortes de vents dans le pays : les vents des côtes, les vents locaux, et les vents provenant de l'océan dont les alizés et les cyclones.

Les vents des côtes et locaux peuvent avoir une variation d'intensité journalière, tandis que les vents alizés ont des variations saisonnières. Mais ces deux catégories constituent les vents potentiels pour la mise en place d'une installation éolienne.

Globalement, les régions du Nord, Sud et les côtes Est constituent les zones qui disposent de vitesses de vent intéressantes, atteignant 7,5 à 9 m/s dans le nord, 6 à 9 m/s dans le sud. En considérant les zones du Nord au Sud longeant la côte Est, ayant une vitesse de vent aux environs de 6,5 m/s, Madagascar dispose d'un potentiel de 2 000 MW d'Énergie éolienne.

Le montage des installations éoliennes peut être réalisé localement à partir des matériaux importés notamment la turbine même si certaines entreprises importent la totalité des pièces.

III.1.6) Simulation et collecte des données par le logiciel RETScreen.

RETScreen proposent 42 régions à Madagascar capable d'installer un site éolienne qui présente une vitesse moyenne annuelle supérieur à 3.5m/s mesurer à 10 m du sol.

Le tableau suivant montre le nom des régions avec sa vitesse moyenne de vent annuelle.

| REGIONS | VITESSE MOYENNE ANNUELLE (m/s) |
|--------------------|--------------------------------|
| Ambalavao | 3.4 |
| Ambanja | 4.8 |
| Ambilobe | 5.5 |
| Ambovombe | 4.4 |
| Ampanihy | 4.2 |
| Amparafaravola | 4.3 |
| Andapa | 3.5 |
| Ankazoabo | 4.7 |
| Antalaha | 3.0 |
| Antananarivo/Ivato | 3.1 |
| Antsirabe | 6.0 |
| Antsiranana | 4.8 |
| Antsohihy | 4.4 |
| Bealalana | 4.0 |
| Beloin'iTsiribina | 3.4 |
| Beroroha | 3.9 |
| Betioky | 3.3 |
| Fandrina | 3.7 |
| Farafangana | 3.4 |
| Fianaratsoa | 3.5 |
| Ihosy | 3.0 |

| | |
|-----------------|-----|
| Mahajanga | 4.1 |
| Mahanoro | 4.5 |
| Manakara | 4.1 |
| Mananjary | 4.0 |
| Maroantsetra | 3.9 |
| Marovoay | 4.1 |
| Miandrivazo | 3.9 |
| Moramanga | 4.2 |
| Morondava | 4.0 |
| NosyVarika | 5.5 |
| Soavinandriana | 3.4 |
| Toamasina | 1.8 |
| Toliary | 4.2 |
| Tsaratana | 4.0 |
| Tsihombe | 5.5 |
| Tsiroanomandidy | 3.4 |
| Vangaindrano | 4.0 |
| Vavantenina | 4.8 |

Tableau 9: le nom des régions avec sa vitesse moyenne de vent annuelle.

III.1.6.1) Gisement éolien pour Antananarivo

Concernant la ville d'Antananarivo, commune Ivato représentée par le coordonné géographique de latitude de $-18,8^{\circ}\text{N}$ et de longitude de $47,5^{\circ}\text{E}$, elle possède une vitesse moyenne annuelle de $3,0 \text{ m/s}$ mesurée à 10 mètre du sol. Cette faible vitesse de vent est due à l'influence de la végétation mais également à la présence de reliefs très marqués qui masquent le vent provenant majoritairement du Sud-Est. A cette hauteur, il est impossible de produire de l'électricité par une éolienne donc on préfère d'augmenter la hauteur du mat, pour cela, on a estimé d'installer une éolienne de puissance 100 kW de hauteur du moyeu de 68,5 m. On a estimé pour ce site une production énergétique non corrigée environ de 1050 MWh par turbine.

Voici le tableau qui représente les différentes valeurs des vitesses de vent qui correspondent à des valeurs de puissances et d'énergies récupérables par l'éolienne.

| Vitesse du vent m/s | Courbe de puissance kW | Courbe d'énergie MWh |
|------------------------|------------------------------|----------------------------|
| 0 | 0,0 | |
| 1 | 0,0 | |
| 2 | 0,0 | |
| 3 | 12,0 | 282,2 |
| 4 | 34,0 | 761,8 |
| 5 | 80,0 | 1 482,8 |
| 6 | 158,0 | 2 322,8 |
| 7 | 271,0 | 3 145,7 |
| 8 | 413,0 | 3 859,5 |
| 9 | 586,0 | 4 418,6 |
| 10 | 781,0 | 4 811,5 |
| 11 | 971,0 | 5 049,3 |
| 12 | 1 000,0 | 5 154,7 |
| 13 | 1 000,0 | 5 154,9 |
| 14 | 1 000,0 | 5 076,3 |
| 15 | 1 000,0 | 4 941,8 |
| 16 | 1 000,0 | |
| 17 | 940,0 | |
| 18 | 840,0 | |
| 19 | 750,0 | |
| 20 | 650,0 | |
| 21 | 560,0 | |
| 22 | 475,0 | |
| 23 | 390,0 | |
| 24 | | |
| 25 - 30 | | |

Tableau 10: vitesse de vent, courbe de puissance et d'énergie pour Antananarivo

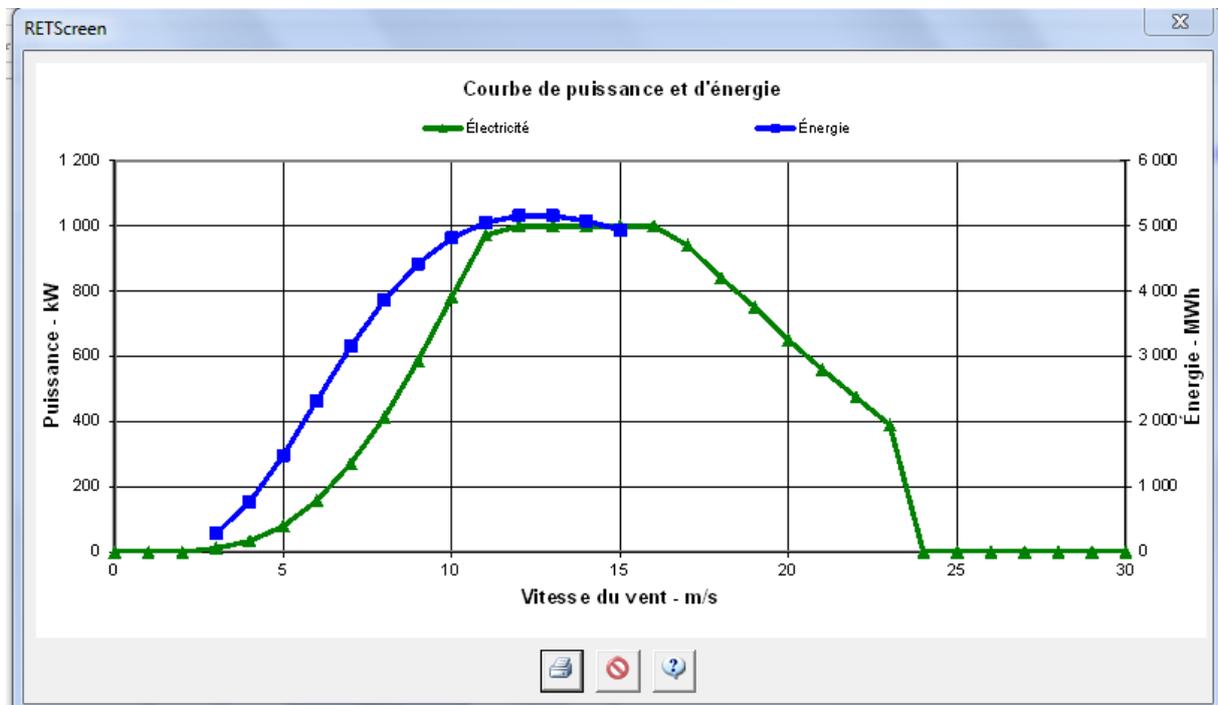


Figure 9: courbe de puissance et d'énergie pour Antananarivo /Ivato

III.1.6.1.1) Interpretation du résultat obtenue

Concernant la courbe de puissance de l'éolienne, ce type d'aérogénérateur a commencé à produire de l'électricité à une puissance de l'ordre de 50 kW si la vitesse de vent est supérieure à 3 m/s ; elle atteint son maximum de production d'électricité qui correspond à une puissance environ 1000 kW si la vitesse de vent est comprise entre 11 et 15 m/s, au-delà de cette valeur, l'éolienne s'arrête pour éviter la destruction de l'appareil. La production annuelle de l'énergie pour ce site est maximum est de l'ordre de 5000 MWh si le vent souffle à une vitesse de 12 m/s.

III.1.6.1.2) Gisement éolien pour Fianarantsoa

D'après les données présentées par RETScreen, Fianarantsoa possède une vitesse moyenne annuelle de 3,4 m/s mesurée à 10 m de sol. On a évalué d'installer une éolienne de capacité électrique de 750 kW ayant une moyenne de hauteur de 46 m. Le nombre d'éoliennes installées dépend du besoin de la population.

| Vitesse du vent m/s | Courbe de puissance kW | Courbe d'énergie MWh |
|------------------------|------------------------------|----------------------------|
| 0 | 0,0 | |
| 1 | 0,0 | |
| 2 | 0,0 | |
| 3 | 0,0 | 150,9 |
| 4 | 15,0 | 447,1 |
| 5 | 52,0 | 902,2 |
| 6 | 97,0 | 1 460,2 |
| 7 | 163,0 | 2 048,3 |
| 8 | 251,0 | 2 612,4 |
| 9 | 356,0 | 3 123,6 |
| 10 | 459,0 | 3 570,3 |
| 11 | 608,0 | 3 948,3 |
| 12 | 691,0 | 4 256,2 |
| 13 | 735,0 | 4 494,6 |
| 14 | 750,0 | 4 665,9 |
| 15 | 766,0 | 4 774,9 |
| 16 | 772,0 | |
| 17 | 776,0 | |
| 18 | 779,0 | |
| 19 | 779,0 | |
| 20 | 779,0 | |
| 21 | 779,0 | |
| 22 | 779,0 | |
| 23 | 779,0 | |
| 24 | 779,0 | |
| 25 - 30 | 779,0 | |

Tableau 11: vitesse de vent, courbe de puissance et d'énergie pour Fianarantsoa

III.1.6.1.3) Tracage de la courbe

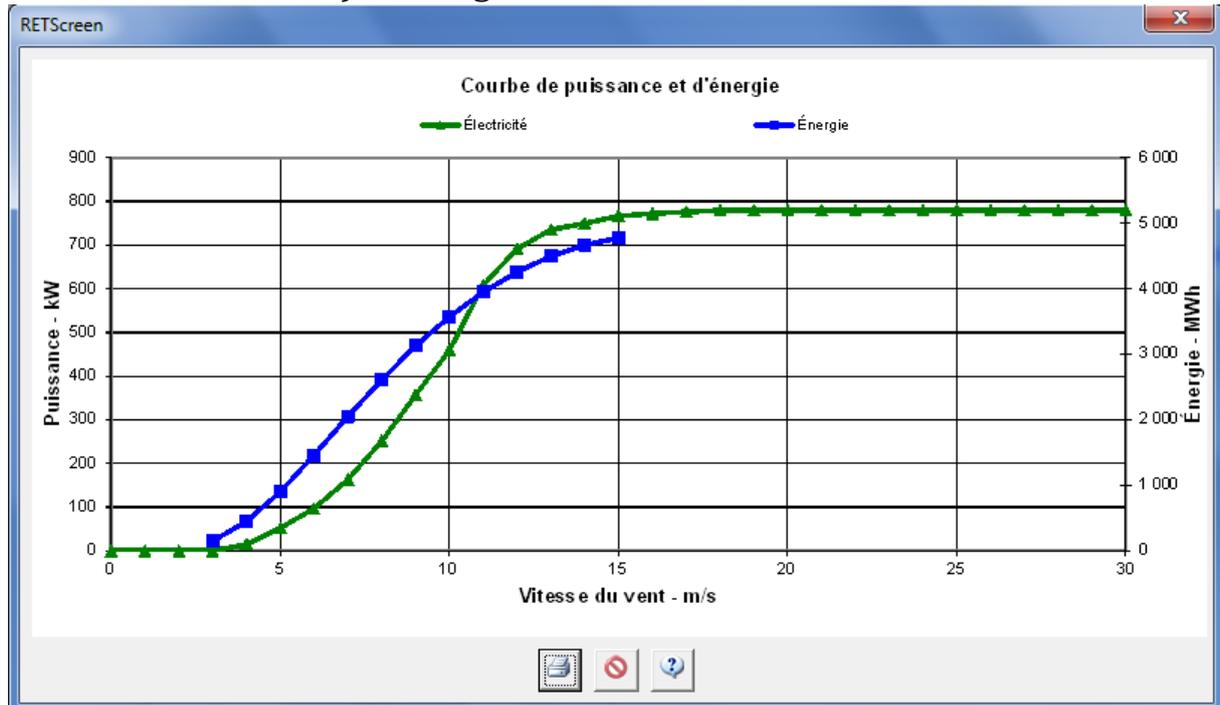


Figure 10: courbe de puissance et d'énergie pour fianarantsoa

III.1.6.2) Gisement éolienne pour la ville de Mahajanga

D'après le résultat obtenu par la simulation avec RETScreen, Mahajanga présente une vitesse moyenne annuelle de vent de l'ordre de 3m /s mesurer à 10m du sol .le résultat du calcule nous renseignes qu'on a estimé une production énergétique non corrigée de l'ordre de 447MWh par une éolienne de capacité électrique par turbine de 750 KW de hauteur de moyeu égale à 46 m .

| Vitesse du vent m/s | Courbe de puissance kW | Courbe d'énergie MWh |
|------------------------|------------------------------|----------------------------|
| 0 | 0,0 | |
| 1 | 0,0 | |
| 2 | 0,0 | |
| 3 | 0,0 | 150,9 |
| 4 | 15,0 | 447,1 |
| 5 | 52,0 | 902,2 |
| 6 | 97,0 | 1 460,2 |
| 7 | 163,0 | 2 048,3 |
| 8 | 251,0 | 2 612,4 |
| 9 | 356,0 | 3 123,6 |
| 10 | 459,0 | 3 570,3 |
| 11 | 608,0 | 3 948,3 |
| 12 | 691,0 | 4 256,2 |
| 13 | 735,0 | 4 494,6 |
| 14 | 750,0 | 4 665,9 |
| 15 | 766,0 | 4 774,9 |
| 16 | 772,0 | |
| 17 | 776,0 | |
| 18 | 779,0 | |
| 19 | 779,0 | |
| 20 | 779,0 | |
| 21 | 779,0 | |
| 22 | 779,0 | |
| 23 | 779,0 | |
| 24 | 779,0 | |
| 25 - 30 | 779,0 | |

Tableau 12: vitesse de vent, courbe de puissance et d'énergie pour Mahajanga.

III.1.6.3) Courbe représentative

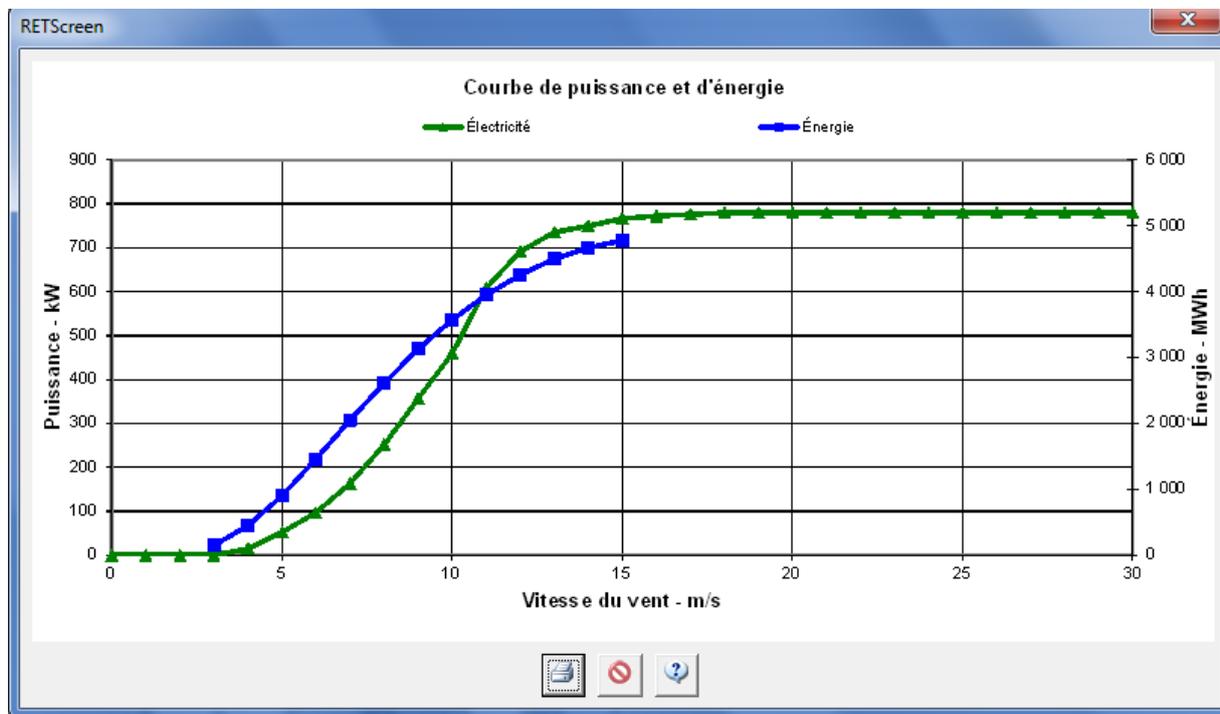


Figure 11: courbe de puissance et d'énergie pour Mahajanga

III.1.6.4) Gisement éolienne pour la ville de Antsiranana

Le nord du pays présente de très nombreux sites avec des vitesses moyennes de vent supérieures à 5m/s à 10 m de hauteur, moyennes annuelles.

D'après le données météorologique requis par RETScreen, la ville d'Antsiranana possède une vitesse moyenne annuelle de 6m/s.

On a évalué une production énergétique non corrigée de 6092 MWh par turbine avec une éolienne de capacité électrique par turbine de 1500Kw.

III.1.6.5) Tableau des vitesses de vent,de courbe de puissance et d'énergie

| Vitesse du vent m/s | Courbe de puissance kW | Courbe d'énergie MWh |
|------------------------|------------------------------|----------------------------|
| 0 | 0,0 | |
| 1 | 0,0 | |
| 2 | 0,0 | |
| 3 | 5,0 | 306,6 |
| 4 | 27,0 | 909,1 |
| 5 | 101,0 | 1 854,9 |
| 6 | 195,0 | 3 016,7 |
| 7 | 327,0 | 4 225,5 |
| 8 | 513,0 | 5 363,5 |
| 9 | 729,0 | 6 375,1 |
| 10 | 993,0 | 7 242,9 |
| 11 | 1 288,0 | 7 965,3 |
| 12 | 1 500,0 | 8 544,9 |
| 13 | 1 500,0 | 8 986,0 |
| 14 | 1 500,0 | 9 296,0 |
| 15 | 1 500,0 | 9 485,4 |
| 16 | 1 500,0 | |
| 17 | 1 500,0 | |
| 18 | 1 500,0 | |
| 19 | 1 500,0 | |
| 20 | 1 500,0 | |
| 21 | 1 500,0 | |
| 22 | 1 500,0 | |
| 23 | 1 500,0 | |
| 24 | 1 500,0 | |
| 25 - 30 | 1 500,0 | |

Tableau 13: vitesse de vent, courbe de puissance et d'énergie pour Antsiranana.

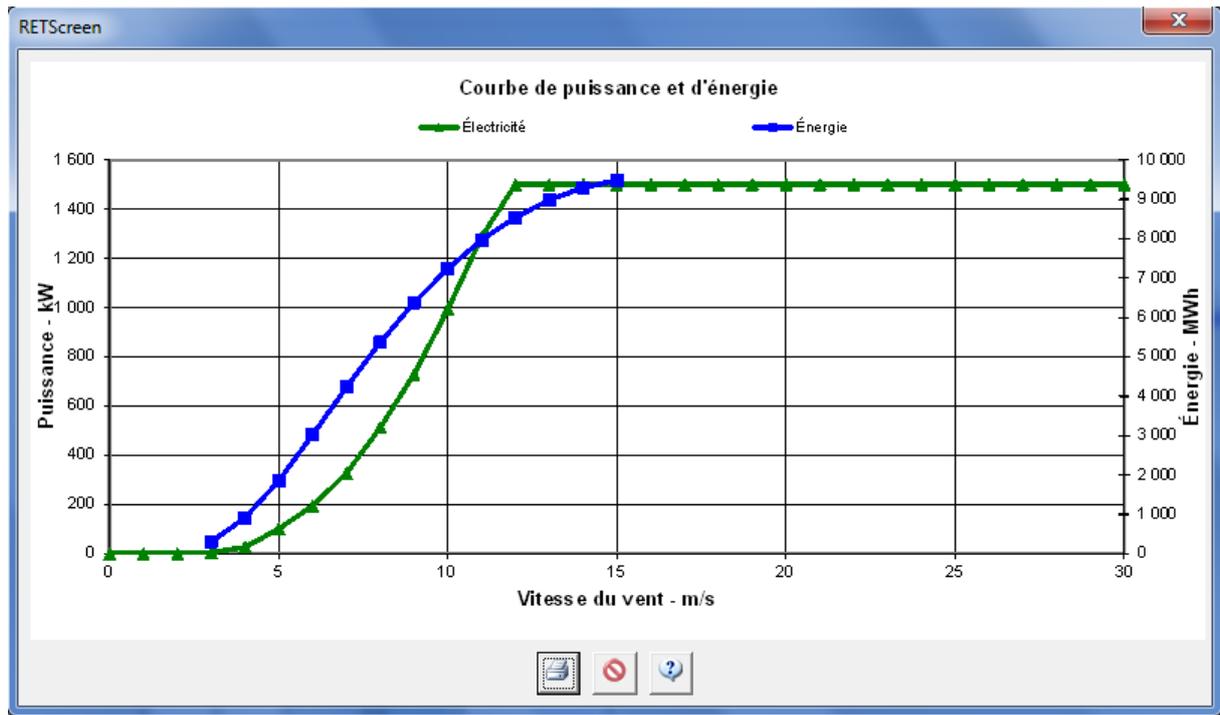


Figure 12: courbe de puissance et d'énergie pour Antsiranana

III.1.6.6) Gisement éolienne pour la ville de Toliary

L'extrême Sud de Madagascar est favorablement exposés aux vents.

Pour les zones, où végétation et relief ne jouent pas de rôle de masque, on estime une ressource vent moyenne supérieure à 4 m/s à 10 m de hauteur. Avec sa vitesse moyenne annuelle, On a apprécié une production énergétique non corrigée de 3138 MWh par turbine avec un aérogénérateur de 70 m de hauteur du moyeu.

Le Sud de Madagascar connaît un climat aride, avec une densité de population faible. Le projet éoliens de type centrales éoliennes autonomes, doivent être favorisés, car ils permettront de désenclaver le monde rural de cette région en apportant un service de qualité, qui répondra à l'ensemble des besoins énergétiques des populations.

III.1.6.6.1) Tableau des vitesses de vent, de courbe de puissance et d'énergie

| Vitesse du vent m/s | Courbe de puissance kW | Courbe d'énergie MWh |
|------------------------|------------------------------|----------------------------|
| 0 | 0,0 | |
| 1 | 0,0 | |
| 2 | 0,0 | |
| 3 | 5,0 | 306,6 |
| 4 | 27,0 | 909,1 |
| 5 | 101,0 | 1 854,9 |
| 6 | 195,0 | 3 016,7 |
| 7 | 327,0 | 4 225,5 |
| 8 | 513,0 | 5 363,5 |
| 9 | 729,0 | 6 375,1 |
| 10 | 993,0 | 7 242,9 |
| 11 | 1 288,0 | 7 965,3 |
| 12 | 1 500,0 | 8 544,9 |
| 13 | 1 500,0 | 8 986,0 |
| 14 | 1 500,0 | 9 296,0 |
| 15 | 1 500,0 | 9 485,4 |
| 16 | 1 500,0 | |
| 17 | 1 500,0 | |
| 18 | 1 500,0 | |
| 19 | 1 500,0 | |
| 20 | 1 500,0 | |
| 21 | 1 500,0 | |
| 22 | 1 500,0 | |
| 23 | 1 500,0 | |
| 24 | 1 500,0 | |
| 25 - 30 | 1 500,0 | |

Tableau 14: vitesse de vent, courbe de puissance et d'énergie pour Toliary.

III.1.6.6.2) Courbe représentative

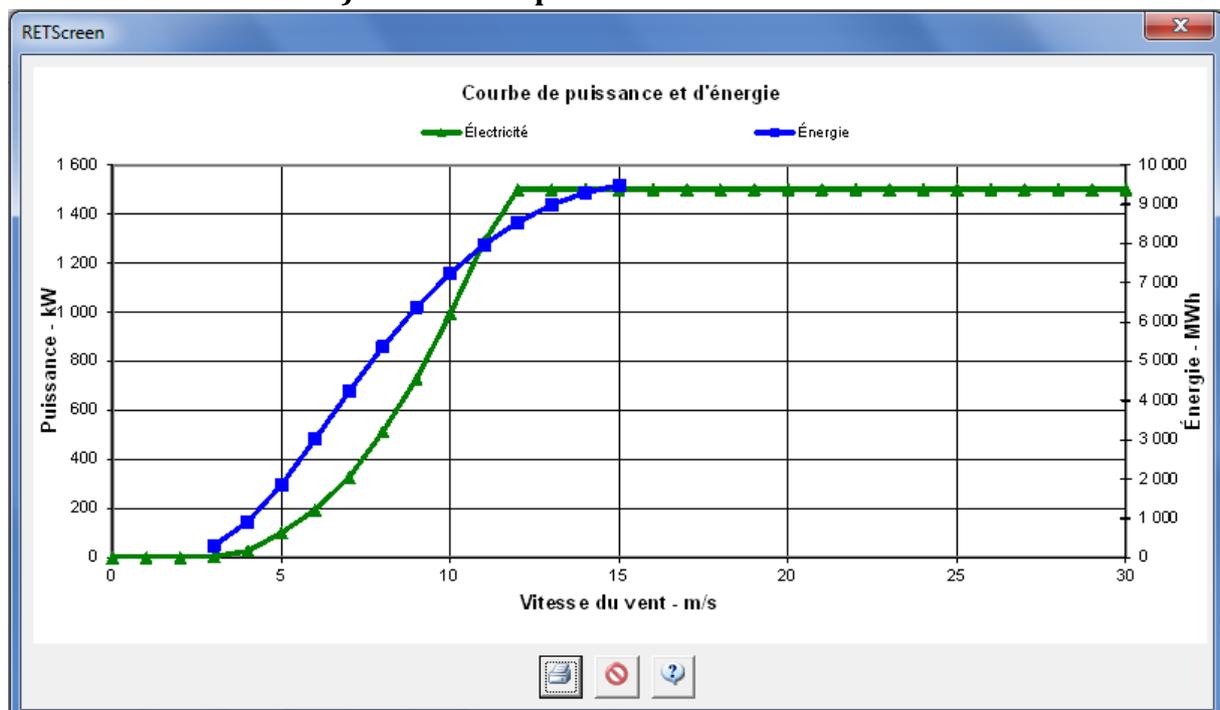


Figure 13: courbe de puissance et d'énergie pour Toliary

Conclusion

Madagascar bénéficie une ressource éolienne fabuleuse, comme le confinée ce résultat avec le logiciel RETScreen.

Les régions Nord du Pays présente de très nombreux sites avec des vitesses moyennes annuelles de vent supérieures à 4m/s à 10m de hauteur par exemple Antsohihy4, 8 m/s, Tsaratanana4, 0 m/s.

Cap Diégo et les alentours est véritablement la zone à privilégier sur la région Nord de Madagascar pour développer les premiers projets éoliens d'envergures. En effet, plusieurs sites peuvent être identifiés, répondant aux contraintes de faisabilité :

- un gisement éolien important, vent moyen à 10m > 4,5m/s (Ambanja, Ambilobe, Ankazoabo, NosyVarika, etc.)
- la proximité des voies d'accès,
- la proximité des centres urbains,
- un potentiel de développement économique.

Plusieurs sites peuvent être également retenus, dont les vitesses de vent sont supérieures à 4, 5m/s à 10m : la frange côtière, proche de la ville de Sambava, les alentours d'Antsirabe, la ville de Sambava et ses environs.

Le Centre de Madagascar (régions étendant du 16° au 24° de latitude sud) : sur cette zone, le gisement éolien moyen est compris entre 3 et 3,5m/s à 10m.

Le sud du pays : l'extrême Sud de Madagascar est favorablement exposé aux vents. Pour les zones, où la végétation et relief ne jouent pas de rôles de masque, on estime une ressource vent moyenne supérieure à 3,9 – 4,5m/s à 10m de hauteur. On doit essentiellement retenir toute la bordure côtière de l'extrême Sud du pays et plus particulièrement:

- les environs de Taolagnaro
- la zone Sud-Est proche de Tsihombe, en bord de mer, balayée par les vents, avec un gisement éolien moyen de 4,5m/s à 10m.

Cette étude nous permet de connaître le potentiel en terme d'éolien pour différents région de Madagascar est d'envisager la taille de l'aérogénérateur à installer sur ces différentes site et d'évaluer la production énergétique non corrigée dans ces différents région.

Comme perspective d'avenir, pour bien améliorer les résultats, il est utile d'utiliser plusieurs logiciels pour modéliser, optimiser ou dimensionner et faire d'analyser de fermes éoliennes comme Wind Farm, OpenWind, WindSim ou Windographer.

La collaboration avec le département de la METEOROLOGIE malgache est aussi complètera la données manquantes.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Jean MARTIN « Énergies éoliennes »

[2] Lilia AICHE-HAMANE, Mustapha HAMANE et Maiouf BELHAMEL Division Bioénergie Environnement, Centre de Développement des Energie Renouvelables.

« ETUDE DE LA FAISABILITE DE LA PRODUCTION D'HYDROGENE PAR L'ENERGIE EOLIENNE DANS LA REGION DE GHARDAIA » ; 27-29 Octobre 2007.

[3] Ministre de Ressources naturelles Canada 1997-2004. « Modèle RETScreen® pour projets de centrale éolienne »

[4] M. Kazet, R. Mouangue, A. Kuitche, J.M. Ndjaka, S. Takam; « Modélisation et simulation numérique des données du vent en vue d'une prédiction de l'énergie électrique d'origine éolienne: cas d'un site de la ville de Ngaoundéré au Cameroun » 28 Juillet 2013.

[5] M. A. Tabet Helal et N. Ghellai « Le Gisement Eolien à Beni-Saf Région Côtière de l'Ouest Algérien »

Auteur : RAKOTOARIVELO Robert Tantelinirina

Titre : « GISEMENT EOLIN A MADAGASCAR »

Mail : tantelinirinarr@gmail.com

Encadreur : Madame RAKOTOJOSEPH Onimihamina Maitre de conférences à l'Université d'Antananarivo

RESUME

Madagascar dispose d'importantes potentialités en termes de ressources pour la production d'Energie éolienne.

Globalement, les régions Nord, Sud et les côtes Est constituent les zones qui disposent de vitesse de vent intéressante, atteignant 3,5 à 4,5 m/s mesurée à 10m du sol dans le Nord, 4 à 6 m/s dans le Sud. En considérant les zone du Nord au Sud, longeant la côte Est, ayant une vitesse de vent aux environs de 4,5 m/. Madagascar dispose d'un potentiel de 2 000 MW d'Energie éolienne. Malgré, actuellement l'exploitation de cette source d'énergie n'est actuellement aucune phase de démarrage.

L'objectif est d'exploiter les données requises par RETScreen pour aider à la réalisation des projets éoliennes réalisables, rentables et satisfait à la besoin de la population rurale.

ABSTRACT

Madagascar has significant potential in terms of resources for the production of wind energy.

Overall, the North, South and East coasts are the areas that have interesting wind speed, reaching 3.5 to 4, 5 m / s measured at the ground 10m in the north 4-6 m / s in the South. Considering the Northern Zone in the south, along the East Coast, with a wind speed of around 4.5 m /. Madagascar has a potential of 2000 MW of wind energy. Despite currently exploiting this energy source is currently no startup phase.

The aim is to exploit the data required by RETScreen to help achieve feasible wind projects, cost effective and meets the needs of the rural population.

MOTS CLES

RETScreen, Vitesse moyenne annuelle du vent par région, Courbe de puissance, Courbe d'énergie.