

SOMMAIRES

DECLARATION SUR L'HONNEUR

REMERCIEMENT

SOMMAIRES

LISTE DES TABLEAU

LISTE DES ILLUSTRATIONS

LISTE DES ANNEXES

LISTE DES ABREVIATIONS

LISTE DES UNITES

INTRODUCTION

PARTIE I : GENERALITES ET THEORIES SUR LES EOLIENNES

Chapitre I : Description du projet

Chapitre II : Energie éolienne

**PARTIE II : ETUDE DE LA MISE EN ŒUVRE D'UN NOUVEAU SYSTEME
D'ALIMENTATION DES POMPES A LA STATION DE PRODUCTION D'EAU
POTABLE DE LA VILLE DE VOHEMAR**

Chapitre - III. Calculs techniques dimensions électriques

Chapitre - IV. Calculs techniques dimensions hydraulique

Chapitre - V. Calcul sur la fondation éolienne

PARTIE III : EVALUATION FINANCIERE DU PROJET

Chapitre - VI. Evaluation financière du projet

CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXE

TABLE DES MATIERES

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|----|
| Tableau 1 : Coefficient de cisaillement ou rugosité du sol | 11 |
| Tableau 2 : Comparaison des éoliennes à axe horizontal, et à axe vertical | 24 |
| Tableau 3: Temps de pompage avec les débits (fonctionnement actuel) | 35 |
| Tableau 4: l'énergie consommée par jour | 36 |
| Tableau 5: Eolienne 20 kW PERFEO-20000..... | 45 |
| Tableau 6: Vitesse moyenne du vent (météo et windfinder) et puissance obtenue par la courbe de puissance PERFEO 20000..... | 47 |
| Tableau 7 : Temps de fonctionnement en mois d'aout (vent favorable)..... | 62 |
| Tableau 8: Pour les branchements particuliers..... | 72 |
| Tableau 9: Caractéristiques de chaque nœud | 73 |
| Tableau 10: Caractéristiques de chaque tuyau | 74 |
| Tableau 11 : Les index récoltés par les exploiters..... | 76 |
| Tableau 12 : Les index relevé par compteur distribuées | 77 |
| Tableau 13 : Caractéristique du réservoir 300m3 pour la simulation | 80 |
| Tableau 14 : Représentation de statistique moyenne journalière, PIC et simulation production éolienne | 82 |
| Tableau 15 : Vitesse de la moyenne du vent en fonction des puissances et débit d'eau refoulée | 84 |
| Tableau 16 : Résultats des calculs..... | 89 |
| Tableau 17 : Description des différents éléments constitutif du mât | 91 |
| Tableau 18: Devis estimatif..... | 93 |
| Tableau 19 : Investissement (subvention) sur la pompe éolienne + GE JIRAMA | 95 |
| Tableau 20: Simulation sans énergie éolienne | 96 |

LISTE DES ILLUSTRATIONS

| | |
|--|----|
| Illustration 1 : Carte de localisation de la zone d'étude (source FTM)..... | 6 |
| Illustration 2 : Anémomètre à moulinet | 9 |
| Illustration 3 : Anémomètre à deux directions | 10 |
| Illustration 4 : Les capteurs à axe vertical | 10 |
| Illustration 5 : Vitesse moyenne en fonction la hauteur..... | 12 |
| Illustration 6 : Capteur de vitesse | 13 |
| Illustration 7 : Illustration du concept de terrain plat et non plat | 15 |
| Illustration 8 : Illustration de la zone d'influence sur l'écoulement d'un obstacle | 16 |
| Illustration 9 : Ecoulement sur un terrain non plat avec de petites caractéristiques | 17 |
| Illustration 10 : Illustration d'un chargement asymétrique sur le rotor par le vent | 17 |
| Illustration 11 : Principaux composantes d'une éolienne..... | 19 |
| Illustration 12 : Moulin à vent des terres blanches..... | 21 |
| Illustration 13 : Eolienne lente | 22 |
| Illustration 14 : Eolienne rapide | 22 |
| Illustration 15: Eolienne Darrieus | 23 |
| Illustration 16 : Eolienne Savonius | 24 |
| Illustration 17 : Définition de l'angle azimutal (éolienne horizontal)..... | 25 |
| Illustration 18 : Principe de conservation de masse | 26 |
| Illustration 19 : Coupe litho-stratigraphique et technique du forage F1 | 32 |
| Illustration 20 : Coupe litho-stratigraphique et technique du forage F2 | 33 |
| Illustration 21 : Colonne d'air | 39 |
| Illustration 22 : Variation de C_p en fonction de vitesse du vent..... | 41 |
| Illustration 23 : Veine de vent à la traversée de l'aéromoteur..... | 41 |

| | |
|--|----|
| Illustration 24 : Courbe de puissance PERFEO 20000 | 46 |
| Illustration 25 : Diagramme des vitesses..... | 48 |
| Illustration 26 : Onduleur hybride Effekta WKS 5630VA 48V..... | 50 |
| Illustration 27 : Onduleur UPS 6,13 KVA | 51 |
| Illustration 28 : Onduleurs avec transformateur d'isolement..... | 52 |
| Illustration 29 : Connexion en autoconsommation (Éolienne PERFEO 20000)..... | 53 |
| Illustration 30 : Courbe pompe classique | 54 |
| Illustration 31: Courbe pompe de surface du puits | 55 |
| Illustration 32: Courbe pompe immergée du forage F1 | 55 |
| Illustration 33: Courbe pompe immergée du forage F2 | 56 |
| Illustration 34 : Relation entre la puissance, vitesse de rotation et vitesse du vent..... | 57 |
| Illustration 35 : Plage de fonctionnement de la pompe puits | 58 |
| Illustration 36 : Plage de fonctionnement de la pompe F1 | 59 |
| Illustration 37 : Plage de fonctionnement de la pompe F2..... | 60 |
| Illustration 38 : Simulation de fonctionnement actuelle du réseau | 69 |
| Illustration 39 : Graphe d'évolution de débit (arc 8 avant d'entrée au réseau)..... | 70 |
| Illustration 40 : Graphe d'évolution de vitesse (arc 8, avant d'entrée au réseau)..... | 71 |
| Illustration 41 : Graphe d'évolution de pression en amont, avant d'entrée au réseau | 72 |
| Illustration 42 : Courbe modulation | 73 |
| Illustration 43 : Volume d'eau distribuée..... | 78 |
| Illustration 44 : Courbe de hauteur d'eau dans le réservoir 150 m ³ | 79 |
| Illustration 45 : Courbe de hauteur d'eau dans réservoir 300 m ³ | 81 |
| Illustration 46: Balance en eau pour le système | 81 |
| Illustration 47 : Simulation de fonctionnement avec éolienne du réseau..... | 83 |
| Illustration 48 : Courbe de hauteur d'eau dans réservoir 300 m ³ lors de la 2 ^{ème} simulation.. | 85 |

| | |
|---|----|
| Illustration 49 : Hauteur d'eau dans le réservoir 150 m ³ pour des débits constants..... | 85 |
| Illustration 50 : Hauteur d'eau dans le réservoir 300 m ³ pour des débits constants..... | 86 |
| Illustration 51 : Les efforts agissants sur le mât..... | 88 |

LISTE DES ANNEXES

| | |
|--|-------|
| Annexe 1 : Base de donnée météo, Vitesse du vent en m/s à 10 m de haut à vohemar | I |
| Annexe 2 : Base de données Wind Finder, Vitesse du vent en m/s à 10 m de haut à vohemar | I |
| Annexe 3: Production actuel de la station de Vohemar | II |
| Annexe 4 : Caractéristiques techniques de l'onduleur pour la pompe du puits | III |
| Annexe 5 : Caractéristiques techniques de l'onduleur pour la pompe du forage F1 | III |
| Annexe 6 : Caractéristiques techniques de l'onduleur pour la pompe du forage F2 | V |
| Annexe 7: Caractéristiques de la pompe de puits | VI |
| Annexe 8: caractéristique de la source d'ANDRORONA | VII |
| Annexe 9: Caractéristiques de fonctionnement de forage F1 (Z62205-405T) | VIII |
| Annexe 10: Caractéristique pompe de forage F2 Z612 05-40S T | XI |
| Annexe 11: Temps de marche et Arrêt de chaque pompe..... | XV |
| Annexe 12: Statistique en eau Vohemar | XVI |
| Annexe 13: statistique moyenne, PIC et simulation production journalière éolienne | XVII |
| Annexe 14: Calcul du Génie Civil | XIX |
| Annexe 15: capacité portante du sol..... | XX |
| Annexe 16: caractéristiques de la nouvelle pompe de surface du puits | XX |
| Annexe 17: caractéristiques de la nouvelle pompe immergée du forage F1 | XXI |
| Annexe 18: caractéristiques de la nouvelle pompe immergée du forage F2..... | XXII |
| Annexe 19: calculs des câbles | XXIII |
| Annexe 20: BDE (bordereaux Devis Estimatifs) | XXIV |

LISTE DES ABREVIATIONS

| | |
|--------|---|
| AC | : Courant continu |
| BDE | : Bordereaux Devis Estimatifs |
| Cp | : coefficient de performance |
| DC | : Courant Alternatif |
| DDPS | : Département de Développement et Projets Spécifiques |
| DEXO | : Direction Exploitation en Eau |
| DHP | : Dynamics Head Pressure |
| FTM | : FOIBEN-TAOSARINTANIN'I MADAGASIKARA |
| GAP | : Manque à gagnée |
| GE | : Groupe Electrogène |
| Hg | : Hauteur géométrique de refoulement |
| HMT | : Hauteur Manométrique Total |
| JIRAMA | : JIRO sy RANO MALAGASY |
| LDC | : Ligne De Courant |
| NPSH | : Net Positive Suction Head |
| PU | : Prix Unitaire |
| PVC | : Poly Vinyle Chloride |
| TRI | : Taux de Rentabilité Interne |
| TTC | : Toute Taxe Comprise, |
| TVA | : Taxe sur la Valeur Ajoutée |
| VAN | : Valeur Actualisée Nette |

LISTE DES UNITES

| | |
|-------------|---------------------------|
| m^3 | : Mètre cube |
| m^3/j | : Mètre cube par jour |
| m^3/s | : Mètre cube par seconde |
| $^{\circ}C$ | : Degré Celsius |
| Ar | : Ariary |
| W | : Watt |
| kW | : Kilowatt |
| kVA | : Kilo Volt Ampere |
| m/s | : Mètre par seconde |
| m | : Mètre |
| KWh | : Kilo Watt heure |
| t/min | : tour par minute |
| Kg | : Kilogramme |
| % | : pourcentage |
| Kg/m^3 | : Masse volumique |
| V | : Volt |
| m^3/h | : Mètre cube par heure |
| A | : Ampère |
| H | : heure |
| Kts | : unité de mesure du vent |
| nd | : nœud |
| Hz | : Hertz |
| VA | : Volt Ampère |
| Km/h | : kilo mètre par heure |
| mm^2 | : millimètre carré |

m^2 : mètre carré

W/m^2 : watt par mètre carré

m^3 : mètre cube

Ar/Kg : Ariary par kilogramme

Ar/KWh : Ariary par Kilowatt heure

KWh/ m^3 : kilowatt heure par mètre cube

Sec : seconde

Db(A) : Déci bel

VA : Volt Ampère

INTRODUCTION

Actuellement, la planète entière court un grand danger à cause de la dégradation considérable de l'environnement due aux activités humains et surtout aux exploitations illicites des énergies fossiles. Les prévisions actuelles estiment que tout le pétrole de notre planète serait consommé dans les 40 ans à venir, ce qui poussent les chercheurs à chercher d'autres sources d'énergie exploitable telles que les énergies non fossiles ou renouvelables.

La transition énergétique est actuellement au cœur d'un débat universel ; et les pays développés ont beaucoup investi, ces dernières années, dans les énergies renouvelables, à savoir le solaire et surtout l'éolienne, pour la production des énergies à consommation domestique. Et force est de constater que l'énergie renouvelable présente une économie indiscutable de la consommation en énergie fossile et aussi que c'est une énergie propre.

Les pays en voie de développement accusent cependant un certain retard, faute de financement ou de volonté d'investissement. Cependant à Madagascar deux sites pilotes de centrales solaires ont été installés, ce qui marque une certaine volonté de l'état pour la transition énergétique. Cependant l'éolienne ne semble pas encore faire l'unanimité, peut-être à cause de la non maîtrise de la technologie ou du coût d'investissement qui inquiéterait les décideurs ou d'autres raisons.

Ainsi, il n'est plus à rappeler qu'actuellement, la JIRAMA fait face à une vente à perte en termes de commerce d'énergie, à cause notamment de l'utilisation de l'énergie fossile pour le Groupe électrogène. Par conséquent dans cette étude, nous proposons de simuler un système hybride Eolienne/Groupe électrogène en vue de contribuer partiellement à la résolution de cette problématique. Un système qui pourrait être standardisé dans les centres isolés favorables aux conditions de fonctionnement d'une éolienne.

Pour cette étude on a proposé le site pilote de Vohémar, pour les raisons suivantes :

- Les puissances requises pour la production Eau est d'environ 15 KW,
- Les vents sont favorables, 9 mois sur 12 mois, par rapport à la puissance requise,

On a donc, dans ce mémoire de fin d'étude, comme objectif de faire ressortir les avantages techniques et financiers du système hybride éolienne/ Groupe électrogène.

Ainsi notre mémoire présentera les parties suivantes :

- La première partie, présentera les généralités et les théories sur les éoliennes ;
- La seconde partie sera consacrée à l'étude de la mise en œuvre de ce système à la station de production d'eau potable de la ville de VOHEMAR ;
- La troisième partie sera consacrée à l'évaluation financière du projet.

PARTIE I
GENERALITES ET THEORIES
SUR LES EOLIENNES

CHAPITRE - I. DESCRIPTION DU PROJET

Dans le cadre de la promotion des activités de développement, de l'amélioration et l'intégration des nouvelles technologies en vue de la performance des installations d'une part, et conformément à la nouvelle politique de l'énergie et au contexte de redressement de la JIRAMA d'autre part, le présent projet porte sur les études techniques et financières de l'utilisation des énergies renouvelables (solaires et éoliennes).

Plus précisément, il s'agit de l'étude de la mise en œuvre d'un système éolienne pour l'alimentation en énergie électrique des systèmes de pompes Eau Brute et Eau Potable, afin de réduire l'utilisation des énergies fossiles qui sont des charges pesantes pour la JIRAMA.

Les résultats escomptés sont de mettre en exergue les avantages techniques et financiers des deux systèmes et aussi de faire ressortir éventuellement les inconvénients dans les systèmes étudiés.

Il est à noter que les systèmes sont différents dans les divers secteurs, mais les choix des sites du projet sont fonction de leurs particularités par rapport à la disponibilité des ressources renouvelables et du système de pompage.

I.1. Terme de référence du projet

Dans le cadre de la transition énergétique et développement durable, il est envisagé de modifier la structure des modes de production et de consommation en énergie en utilisant des sources d'énergie sûre et propre au sein de la JIRAMA.

Les enjeux sont :

- De réduire les consommations en gasoil
- De réduire les désagréments et risques de panne et de problème liés aux ravitaillements en gasoil des centres isolés.

Le présent sujet de mémoire consiste à l'étude de mise en œuvre des énergies renouvelables (éolienne alimentant pompes solaires) pour suppléer aux ressources traditionnelles dans les centres isolés de production en eau potable de la JIRAMA.

La problématique à étudier est la maîtrise de la quantité d'eau produite par rapport à la disponibilité discontinue des ressources énergétiques renouvelables (éolienne).

L'étude consistera donc :

- À dimensionner de façon optimale les pompes solaires et la source d'énergie éolienne par rapport aux besoins en énergie de la station de production eau à étudier
- Définir le temps de marche des énergies renouvelables par rapport à la courbe de demande en eau des clients (*pointes d'appel etc.*)
- Gérer les stockages pour préserver la continuité en approvisionnement des clients et déterminer le temps de marche des énergies fossiles.
- À étudier la rentabilité financière des investissements.

Le livrable se focalisera uniquement sur le site de production Eau de Vohémar, qui présente les meilleures conditions d'installation d'une éolienne. L'étude consistera à déterminer les différents paramètres (*énergie du vent, hydrauliques, demande en eau et électriques*) de dimension du projet de façon à permettre l'estimation du coût du projet.

I.2. Localisation du site de projet

L'étude de faisabilité pour la mise en place d'un nouveau système d'alimentation de la pompe ci présente se trouve dans le Fokotany Androrona, commune Vohemar ville, district de VOHEMAR. Vohémar (également appelé Iharana ou Vohimarina) est située dans la partie Nord-Est de la région de SAVA, province Antsiranana Diego-Suerez et s'étale entre les parallèles 13° 22' 30'' latitude Sud et les méridiens 50° 00' 36'' longitude Est, avec une altitude de 10m au niveau de la mer.

La commune Vohimarina est limitée :

- Au Nord par la commune Ampisikinana,
- À l'Est l'océan indien,
- Au Sud par la commune Ampondra
- À l'Ouest par la commune Daraina.

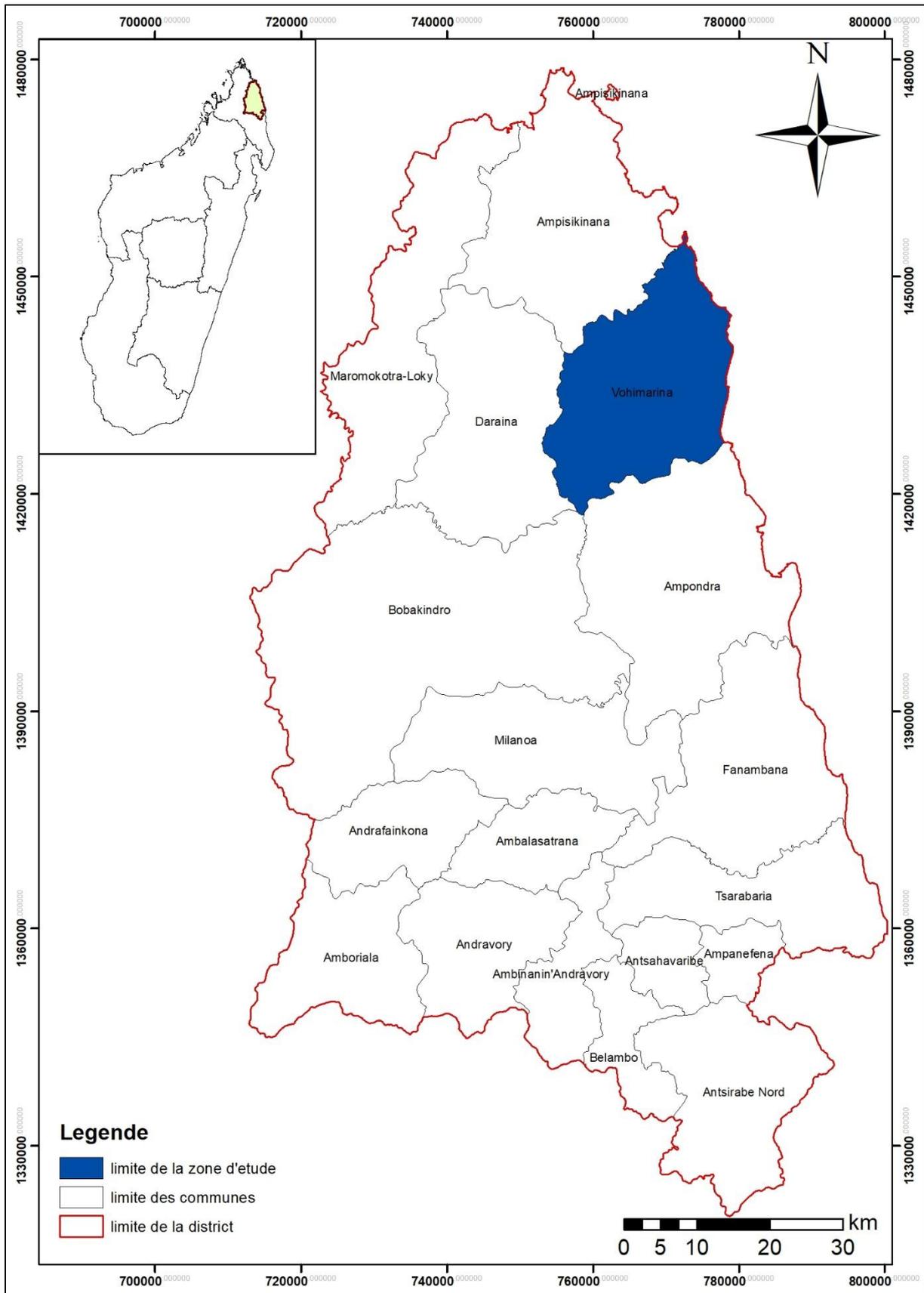


Illustration 1: Carte de localisation de la zone d'étude (source FTM)

CHAPITRE - II. L'ENERGIE EOLIENNE

II.1. Notion d'énergies renouvelables

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie puisées dans les ressources naturelles de la terre qui se renouvellent assez rapidement pour être considérées comme inépuisables pour l'homme. Les énergies renouvelables ont été supplantées depuis près de 200 ans par l'utilisation des combustibles fossiles (gaz, pétrole, charbon) plus appropriés aux développements industriels mais dont la durée de vie est limitée.

Toutes les énergies ne sont cependant pas égales vis à vis de l'impact sur l'environnement. Non seulement cet impact a un coût économique souvent négligé mais il introduit surtout des déséquilibres de l'écosystème. De plus, le rallongement de la durée de vie des combustibles fossiles va dans le sens d'extractions plus coûteuses.

Les énergies renouvelables ont donc petit à petit pris une part importante tant dans le développement économique que dans les impacts positifs sur l'environnement (surtout due à l'épuisement des ressources fossiles, la flambée des cours du brut et la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre).

L'énergie thermique du soleil est alors le grand pourvoyeur des énergies renouvelables car en effet une partie de cette énergie thermique est transformée en énergie mécanique. Celles du vent, des vagues, des courants marins, des précipitations atmosphériques qui donnent naissance au courant des fleuves....

Nous pouvons distinguer ainsi comme types d'énergies renouvelables :

- **L'énergie hydraulique** qui est la plus utilisée, elle peut fournir la consommation en électricité ou encore la consommation en eau exemples : constructions de barrages hydroélectriques, récupération des eaux de pluies ;
- **L'énergie des océans** qui existe sous diverses formes : énergie marémotrice due à l'attraction de la lune, énergie des vagues, l'énergie thermique due à la différence de température entre la surface et les eaux profondes. Les deux dernières formes sont difficilement exploitables et l'énergie marémotrice est rarement exploitée.
- **L'énergie éolienne** qui est utilisée depuis l'antiquité (moulins, marine à voile...). Les avantages de l'utilisation d'une éolienne sont nombreux si on ne parle que pour l'environnement.
- **L'énergie solaire** qui est surtout utilisé dans sa conversion en énergie électrique via la conversion photovoltaïque. Les principales difficultés d'exploitations de l'énergie

solaire reposent d'une part sur sa grande variabilité dans le temps (cycle journalier et annuel) qui implique la nécessité d'un stockage (coûteux et souvent aléatoire).

II.2. Historique de l'éolienne

L'énergie éolienne tire son nom d'Eole, le nom donné par les anciens Grecs au Dieu produisant le vent. L'énergie éolienne est utilisée pour le pompage de l'eau depuis plusieurs siècles. En réalité, c'est la principale technique appliquée pour l'assèchement des zones étendues des Pays-Bas depuis le XIII^{ème} siècle. Les petites pompes éoliennes, généralement en bois, ont été utilisées pour l'assèchement des marécages (en Hollande) et au pompage de l'eau de mer pour l'extraction du sel (France, Espagne et Portugal). Elles sont également utilisées à grande échelle en Europe et elles le sont encore dans certaines régions comme au Cap Vert.

Des programmes importants de recherche et développement ont été entrepris par de nombreux grands pays tels les Etats-Unis. Ces programmes de recherche ont pour objet le perfectionner les pompes éoliennes destinées aussi bien à l'irrigation que pour l'alimentation en eau potable. Pourtant, dans de nombreux pays en développement comme Madagascar, l'usage de l'énergie éolienne résoudrait des problèmes critiques liés à la qualité de vie. Jusqu'à maintenant, pas loin du centre-ville, il y existe encore des zones qui n'ont pas d'accès à l'eau potable, alors que les ressources en vent sont considérables. Il faut alors penser à une utilisation plus intense et plus moderne de cette énergie renouvelable.

II.3. Présentation théorique d'une éolienne

II.3.1. Origine du vent

Généralement, le vent est produit par le soleil. Ce dernier réchauffe la terre à des températures différentes propres à chaque endroit. L'air chaud monte et crée une dépression tandis que l'air froid descend pour combler les vides, afin d'établir l'équilibre. La rencontre des deux types d'air constitue le vent.

Le vent, d'après les encyclopédies, c'est de l'air en mouvement. Le terme est généralement appliqué aux déplacements naturels horizontaux de l'atmosphère : les mouvements de direction verticale ou presque verticale sont des courants.

On peut dire alors que ce phénomène est obtenu par la différence de température. Le même mouvement de l'air existe entre les pôles et l'équateur ainsi que les tropiques suivant la saison. En plus, la rotation de la terre favorise l'existence de vents dominants.

Le vent est une grandeur vectorielle tridimensionnelle. On peut représenter ses trois composantes dans les différents systèmes de repères (cartésien, cylindrique, sphérique). Sa vitesse peut être exprimée en (m/s), en (Km/h) ou en nœud (kts).

Les relations entre ces différentes unités sont :

$$1 \text{ m s}^{-1} = 3,6 \text{ km h}^{-1} = 1,85 \text{ kts}$$

II.3.2. Mesure et hauteur du capteur du vent

II.3.2.1. Mesure

Les appareils de mesure les plus fréquemment utilisées sont les anémomètres. On distingue les anémomètres en deux parties qui sont les capteurs à axe horizontal et vertical.

II.3.2.1.1. Les capteurs à axe horizontal

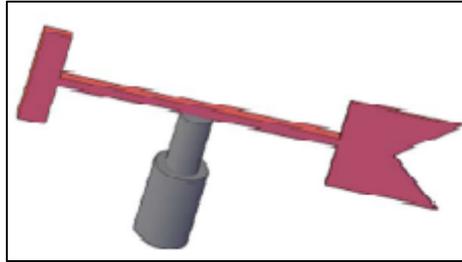
- **Anémomètre à moulinet** (coupelle ou hélice et les girouettes) : pour mesurer la composante horizontale du vent



Source (fr.wikipedia.org)

Illustration 2 : Anémomètre à moulinet

- **L'anémomètre à trois hélices** ou **anémomètre tridimensionnel** ou **anémo-girouettes à deux directions** : pour mesurer à la fois les composantes horizontale et verticale du vent.



Source (fr.wikipedia.org)

Illustration 3 : Anémomètre à deux directions

II.3.2.1.2. Les capteurs à axe vertical

Deux principes différents sont utilisés pour ce type de machines, à savoir la traînée différentielle et la variation cyclique d'incidence.



Source (Encyclopédie Encarta)

Illustration 4 : Les capteurs à axe vertical

II.3.2.2. La hauteur de capteur du vent

La norme pour les relevés correspond à une hauteur de 10 m (hauteur de référence). Si on augmente la hauteur du capteur, alors la vitesse augmente aussi en tenant compte l'effet de rugosité en amont de la machine.

Les rapports des vitesses s'expriment alors :

$$\frac{V_0}{V} = \left(\frac{h_0}{h}\right)^\alpha \quad (1)$$

Comme on sait que la puissance du vent dépend du cube de la vitesse, on a :

$$P_V(h) = P_V(h_0) \times \left(\frac{h}{h_0}\right)^{3\alpha} \quad (2)$$

Avec

- V_0 : vitesse de référence observée à une hauteur de $h_0=10$ m
- $h_0=10$ m : hauteur de référence
- $P_V(h_0)$: Puissance du vent à la hauteur h_0
- " α " : coefficient de cisaillement ou coefficient de rugosité du sol qui est compris entre 0,1 et 0,4.

Voici le tableau qui contient la nature du terrain en fonction de l'exposant de cisaillement du vent.

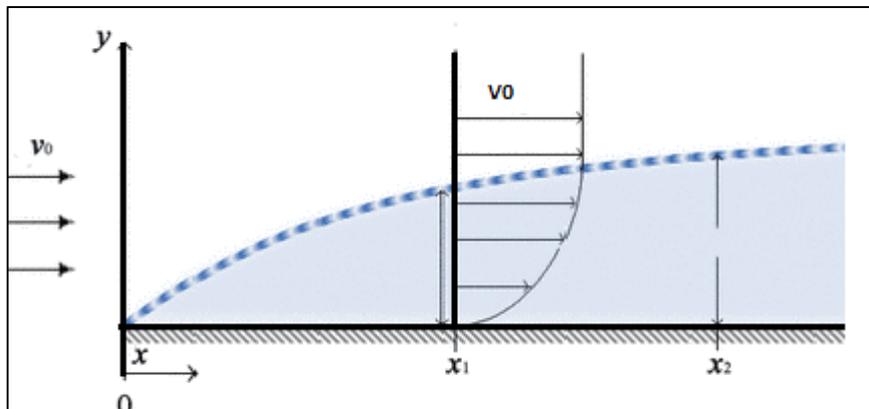
Tableau 1 : Coefficient de cisaillement ou rugosité du sol

| Terrain | Exposant de cisaillement du vent, α |
|--------------------------|--|
| Glace | 0.07 |
| Neige sur terrain plat | 0.09 |
| Mer calme | 0.09 |
| Gazon coupé | 0.14 |
| Gazon court type prairie | 0.16 |

| | |
|-----------------------------------|------|
| Gazon long type cultures céréales | 0.19 |
| Haies | 0.21 |
| Arbres et haies clairsemés | 0.24 |
| Arbres et haies plus denses | 0.29 |
| Banlieue | 0.31 |
| Forêt | 0.43 |

Source : Energie éolienne : Théorie, conception et calcul pratique des installations

De manière très simplifiée, on peut dire que la turbulence ajoute un certain bruit de fond à l'évolution temporelle de la vitesse. Ce que les lois simplifiées proposent d'évaluer ici est l'évolution de la moyenne de la vitesse (où les fluctuations induites par la turbulence ont été filtrées) en fonction de la hauteur au-dessus du sol.



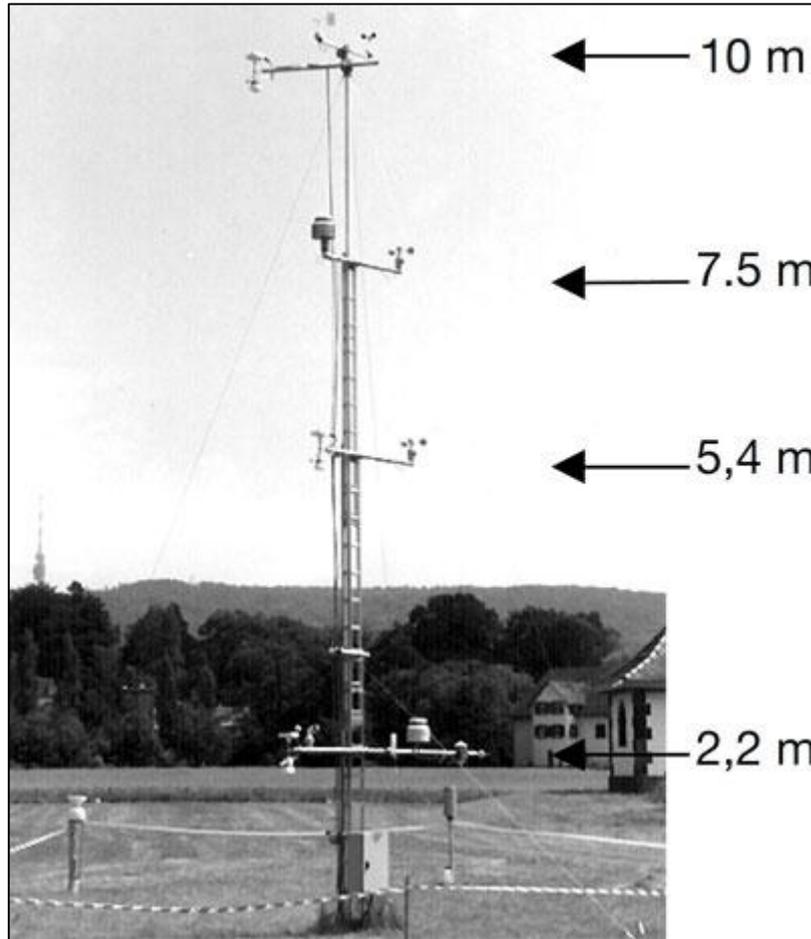
(Wiki Eolienne)

Illustration 5 : Vitesse moyenne en fonction la hauteur

Comparaison entre la visualisation expérimentale d'une couche limite turbulente comprenant un grand nombre de fluctuations et l'évolution de la vitesse moyenne en fonction la hauteur. Les règles que l'on donne ici concernent uniquement l'évolution de la vitesse moyenne avec la hauteur pour les terrains plats, homogènes et sans obstacles.

La plus connue est la loi de puissance. Son fondement théorique est souvent mis en question, mais cette approche s'avère souvent utile sur le terrain ou dans les applications de l'ingénieur.

Remarque : La vitesse du vent est un élément très fluctuant et que le vent mesuré à 2m, 10 m ou 30m n'est pas forcément la même direction et vitesse, comme représenté par la figure ci-dessous.



Source (Encyclopédie Encarta)

Illustration 6 : Capteur de vitesse

II.3.3. Choix du site de l'implantation d'une éolienne

Les sites les plus intéressants sont généralement situés au bord de la mer ou aux sommets de collines et de montagnes bien dégagées. Elle peut être aussi une solution dans les

pays ou les lignes d'interconnexion ne parviendront pas du fait de la faible densité de population même si les vents ne sont pas optimums.

II.3.3.1. Critère naturel

L'efficacité d'une éolienne dépend notamment de son emplacement. En effet, la puissance fournie augmente avec le cube de vitesse du vent, raison pour laquelle les sites sont d'abord choisis en fonction de la vitesse et la fréquence des vents présents. Une éolienne fonctionne d'autant mieux que les vents sont réguliers et fréquents.

II.3.3.2. Autre critère

II.3.3.2.1. La turbulence du vent

C'est la constance de la vitesse et de la direction du vent. Les éoliennes sont utilisables quand la vitesse du vent est supérieure à 10-20 km/h (2,7 à 5,5 m/s), sans toutefois atteindre des valeurs excessives qui conduiraient à la destruction de l'éolienne ou à la nécessité de la <<débrayer >> pour en limiter l'usure ; cela pour un fonctionnement optimal de l'éolienne. Certains sites proches de grands obstacles sont ainsi à proscrire car le vent y est trop turbulent (arbres, bâtiment, escarpements complexes, etc.). On trouve les sites propices à l'installation d'éoliennes en observant si les arbres et la végétation sont constamment courbés par le vent. Certains sites bien spécifiques augmentent la vitesse du vent et sont donc plus propices à une installation éolienne.

II.3.3.2.2. L'effet de VENTURI

Lorsque l'air s'engouffre entre deux obstacles comme deux montagnes ou deux grands bâtiments, il est accéléré par effet VENTURI. De même, lorsqu'il rencontre une colline, l'air est accéléré au niveau du sommet. Ils sont cependant le plus souvent de surface restreinte.

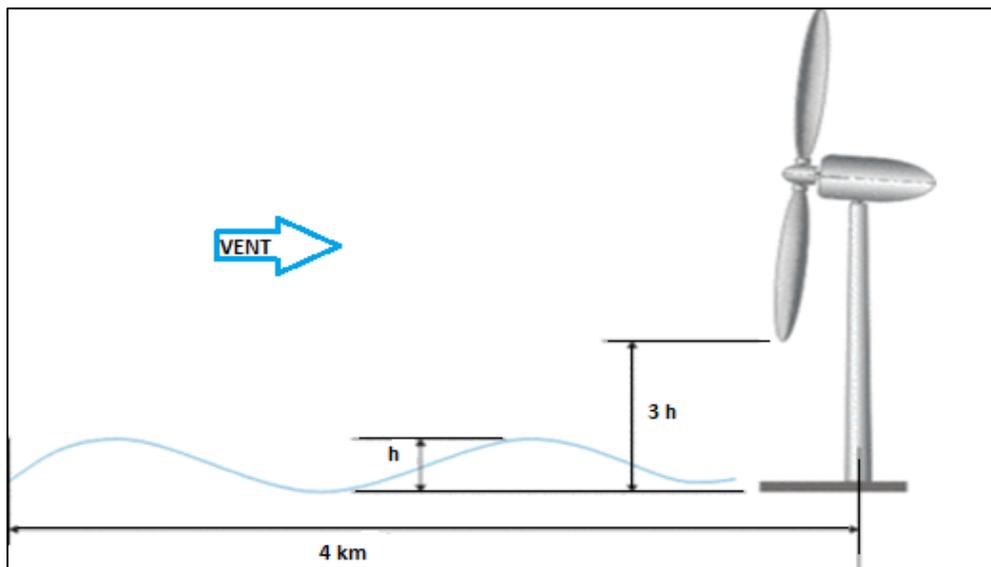
Remarque : La mer et les lacs : il n'y a aucun obstacle au vent, et donc, même à basse altitude, les vents ont une vitesse plus importante et sont moins turbulents.

Les cols de montagne ont eux aussi des vents forts, parce qu'ils canalisent les vents de haute altitude. Dans certains cols, les vents proviennent de l'écart de température entre les deux versants.

II.3.3.2.3. L'accessibilité du site :

Elle doit permettre le transport des gros éléments de l'éolienne (pales, mât, nacelle) et des grues nécessaires à la montagne. Cette contrainte peut limiter la puissance maximale installable par machine.

II.3.3.2.4. Distinction entre terrains plat et non plat



(Wiki Eolienne)

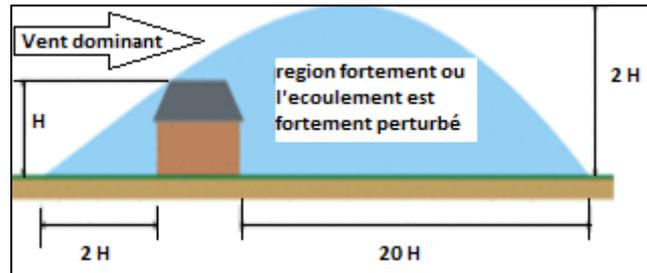
Illustration 7 : Illustration du concept de terrain plat et non plat

Un terrain est non-plat quand les effets du terrain sur l'écoulement de l'air sont significatifs. On peut prendre l'exemple d'une colline ou d'une vallée. À l'opposé, le terrain est considéré comme plat quand il contient de petites irrégularités (par exemple, des haies). Il est difficile d'établir une règle précise pour différencier les deux types de terrain. Voici une proposition rencontrée dans la littérature :

- Le rapport maximum entre la hauteur d'une irrégularité et sa longueur ne peut dépasser 1/50 dans un rayon de 4 km en aval de l'éolienne. En gros, cela favorise les collines à faible pente.

- Le point le plus bas du rotor doit être au moins trois fois plus haut que la plus haute irrégularité sur le terrain dans un rayon de 4 km en aval de l'éolienne.

II.3.3.2.5. Écoulement sur un terrain plat avec des obstacles



(Wiki Eolienne)

Illustration 8 : Illustration de la zone d'influence sur l'écoulement d'un obstacle

Il peut s'agir d'obstacles naturels comme une rangée d'arbres ou des haies, voire d'obstacles érigés par l'homme comme un ou des immeubles. Si un petit immeuble isolé se trouve à plusieurs centaines de mètres d'une grande éolienne, il n'aura guère d'influence sur la nature du vent que le rotor de cette éolienne rencontrera. Il est trop loin. Deuxièmement, l'obstacle doit avoir une hauteur comparable à la taille de l'éolienne. Imaginons un homme ou un tracteur se déplaçant sur le terrain d'une grande éolienne, on comprend rapidement que cela n'aura pas d'influence sur le comportement aérodynamique de l'éolienne.

II.3.3.2.6. Écoulement sur un terrain non plat avec des obstacles

Lorsque l'on se trouve sur un terrain non plat, on a des effets d'accélération et de décélération. Il faut donc veiller à placer l'éolienne dans une zone d'accélération par rapport à la direction dominante du vent.

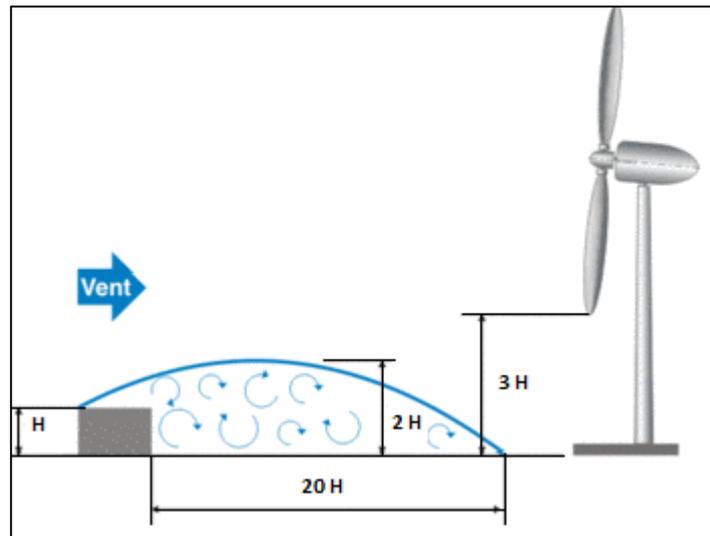


Illustration 9 : Ecoulement sur un terrain non plat avec de petites caractéristiques

II.3.3.2.7. Couche limite et charge sur le rotor

Un autre aspect lié à l'évolution de la vitesse avec la hauteur est la charge aérodynamique sur le rotor. Si l'on place le rotor de l'éolienne trop bas, il recevra comme annoncer un vent plus faible, mais cette vitesse risque en plus de varier significativement le long du rotor. En d'autres termes, les forces exercées par le vent seront plus importantes sur les pales pointées sur le haut que sur les pales pointées vers le bas. Du coup, le rotor est soumis à une contrainte mécanique de nature asymétrique (différence haut-bas) et fluctuante (le rotor passe de la position basse à la position haute). Ces contraintes ont un impact négatif sur la durée de vie du matériel.

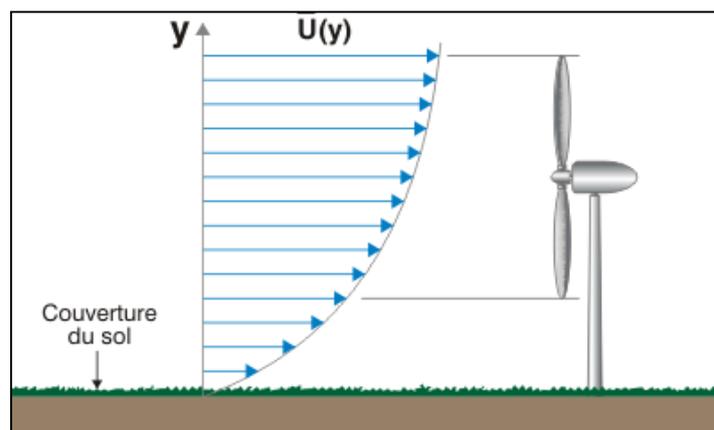


Illustration 10 : Illustration d'un chargement asymétrique sur le rotor par le vent

II.3.4. Les principaux composantes d'une éolienne

Une éolienne comporte de plusieurs composantes qui sont les suivantes.

- **Les pales** : ce sont les capteurs de l'énergie cinétique qui transmettent l'énergie au rotor. Elles sont en fibres de verre et matériaux composites. Leur profil est le fruit d'études aérodynamiques complexes.
- **Le moyeu** : il est pourvu d'un système qui permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation.
- **L'arbre primaire (ou arbre lent)** : il relie les pales au multiplicateur.
- **Le multiplicateur** : il permet de réduire le couple et d'augmenter la vitesse. C'est l'intermédiaire entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire.
- **L'arbre secondaire** : il amène l'énergie mécanique à la génératrice. Il est équipé d'un frein à disque mécanique qui limite la vitesse de l'arbre en cas de vents violents.
- **Le générateur électrique** : il assure la production électrique. Sa puissance peut atteindre jusqu'à 5 MW. Il peut-être une dynamo (produit du courant continu) ou un alternateur (produit du courant alternatif). L'alternateur est le plus utilisé pour des raisons de coût et de rendement.
- **Le mât** : c'est un tube en acier, pilier de toute l'infrastructure. Sa hauteur est importante, plus elle augmente, plus la vitesse du vent augmente mais en même temps le coût de la structure augmente. En général, le mât a une taille légèrement supérieure au diamètre des pales.
- **Le système d'orientation de la nacelle** : c'est une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter l'éolienne et de la verrouiller dans l'axe du vent grâce à un frein.
- **Les outils de mesure du vent** : girouette pour la direction et anémomètres pour la vitesse. Les données sont transmises à l'informatique de commande.
- **Le système de contrôle électronique** : il gère le fonctionnement général de l'éolienne et de son mécanisme d'orientation.
- **Mécanisme d'orientation** : Utilisé pour tourner la turbine contre le vent. On dit que l'éolienne possède une erreur d'orientation lorsqu'elle n'est pas tournée perpendiculairement au sens du vent. Une telle erreur n'implique qu'une part plus restreinte de l'énergie contenue dans le vent passera au travers du rotor.
- **Boîte de vitesse** : La puissance provenant de la rotation du rotor est transmise au générateur par le biais de 2 arbres de transmission et de la boîte de vitesse. La solution

pratique utilisée, en parallèle avec l'industrie automobile, est la mise en place d'une boîte de vitesse. Ainsi la rotation lente et puissante de l'arbre en amont sera transformée en rotation rapide à bas couple en aval de la boîte de vitesse, mieux à même d'être utilisée par le générateur.

- **Anémomètre et girouette** : La mesure de la vitesse du vent est habituellement effectuée à l'aide d'un anémomètre. Possédant un axe vertical et 3 coupoles captant le vent et entraînant sa rotation, le nombre de révolutions effectuées est décompté électroniquement. Généralement couplé à une girouette permettant de déterminer la direction du vent, les informations récoltées sont transmises au mécanisme d'orientation pour placer l'éolienne dans la meilleure position.
- **Système de refroidissement** : Les générateurs nécessitent la mise en place d'un système de refroidissement pour leur bon fonctionnement. Dans la plupart des éoliennes, le refroidissement se fait en plaçant le générateur dans un conduit d'air frais. Certains fabricants utilisent en refroidissement par eau. Cela présente l'avantage d'être plus compact mais nécessite la mise en place d'un radiateur dans la nacelle pour évacuer la chaleur contenue dans le liquide de refroidissement.

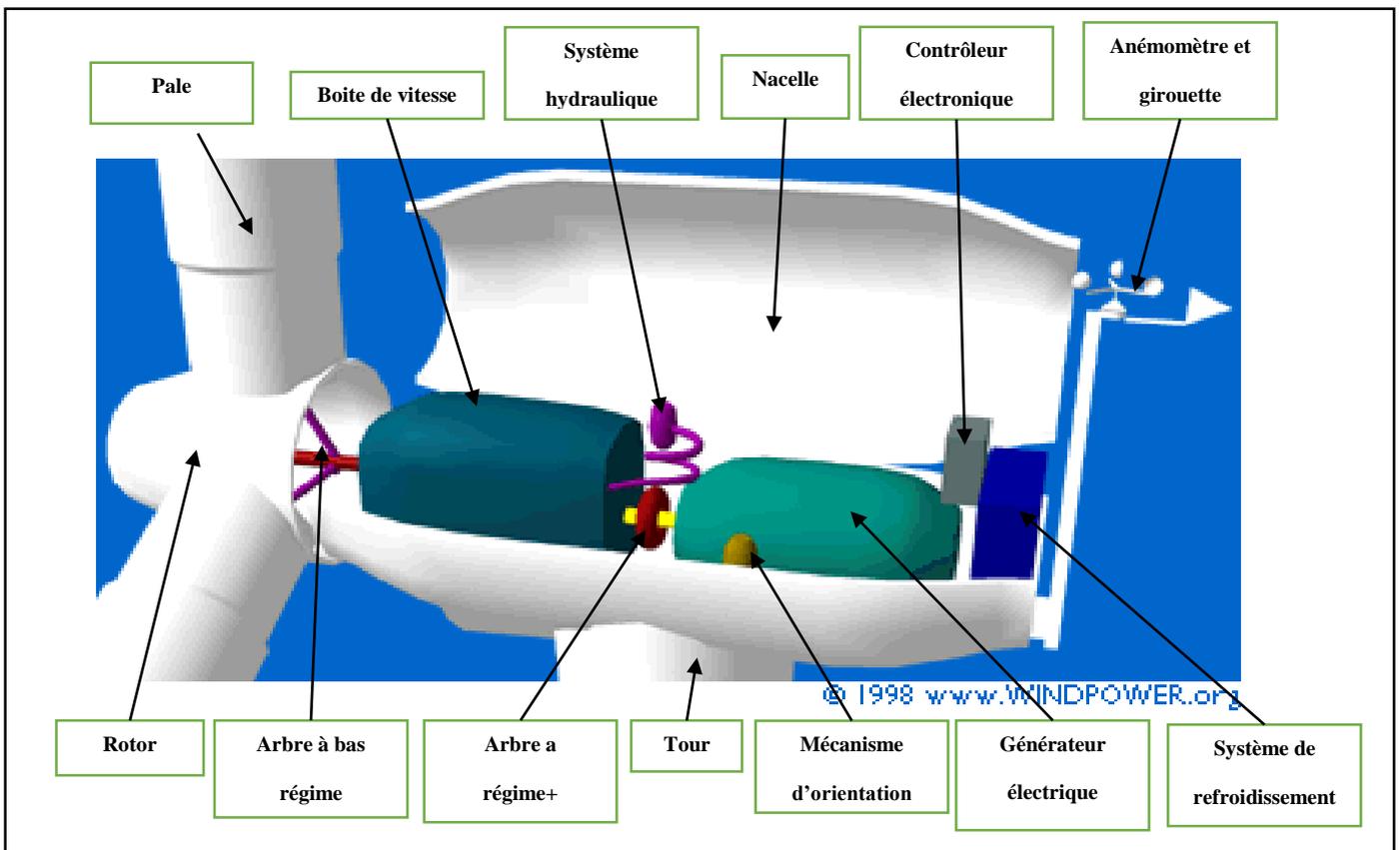


Illustration 11 : Principaux composants d'une éolienne

II.3.5. Les différents types d'éolienne

Les éoliennes peuvent se classer en deux catégories selon l'axe de rotation du rotor :

- À axe horizontal
- À axe vertical

II.3.5.1. L'éolienne à axe horizontal

Les installations éoliennes les plus puissantes qui ont été construites sont du type à axe horizontal. Dans les machines à axe horizontal, on peut distinguer :

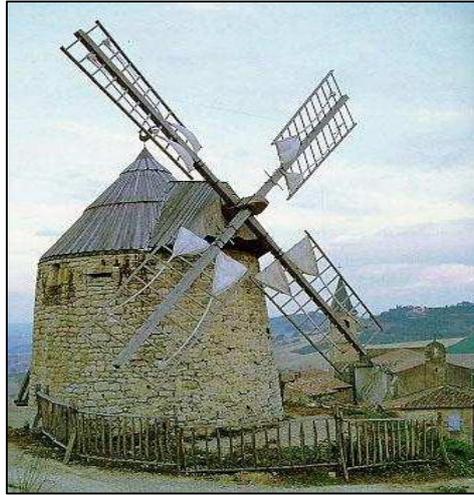
- Les moulins à vent classiques ;
- Les éoliennes lentes ;
- Les éoliennes rapides.

II.3.5.1.1. Les moulins à vent classiques

Beaucoup ont disparu mais plusieurs subsistent encore, qui sont religieusement entretenus par les municipalités ou les particuliers, pour le plus grand plaisir de leurs visiteurs petits et grands. Les moulins à vent peuvent être classés en deux types principaux : les moulins à toit tournant et les moulins à cages tournante.

- Moulin à toit tournant :

La toiture qui porte l'arbre de rotation du moulin, peut tourner au-dessus du bâtiment généralement en maçonnerie et de forme tronconique. Le toit est prolongé vers le bas par une longue poutre dont la manœuvre permet d'orienter les ailes du moulin face au vent. Les plus modernes sont orientés à l'aide d'une roue éolienne auxiliaire.



Source (Encyclopédie Encarta)

Illustration 12 : Moulin à vent des terres blanches

- Moulins à cage tournante

L'axe de rotation de la roue est solidaire de la cage. L'ensemble du moulin est placé sur pivot comme dans le type précédent. L'orientation de la roue face au vent est assurée par un bras d'orientation ou par des éoliennes auxiliaires.

II.3.5.1.2. Les éoliennes lentes.

A partir de 1870, l'éolienne lente à pales multiples fait son apparition en Amérique, puis en Europe. Les pales dont le nombre varie de 12 à 24 couvrent toute la surface de la roue ou sa presque totalité. Elles démarrent à vide pour des vents de l'ordre de 2 à 3[m/s] et leur principale utilisation est le pompage de l'eau, d'où le nom éolien de pompage.



Source (Encyclopédie Encarta)

Illustration 13 : Eolienne lente

II.3.5.1.3. Les éoliennes rapides

Le nombre de pales est ici beaucoup plus restreint puisqu'il varie entre 2 à 4. L'intérêt des éoliennes rapides est qu'elles sont à puissance égale beaucoup plus légères que les éoliennes lentes. Elles présentent, par contre, l'inconvénient de démarrer difficilement. Sauf dispositifs spéciaux, il faut un vent de 3 [m/s] au moins pour qu'elles se mettent à tourner. Elles sont généralement utilisées pour la production de l'énergie électrique.



Illustration 14 : Eolienne rapide

II.3.5.2. L'éolienne à axe vertical :

La particularité de ce type d'éolienne est qu'elles n'ont pas besoin de s'orienter par rapport au vent. Cependant, leur rendement est plus faible que celui des éoliennes à axe horizontal. Il existe deux types différents :

- Darrieus
- Savonius.

II.3.5.2.1. Le type Darrieus

Il est caractérisé par une vitesse de rotation élevée. Dans certain cas, ces éoliennes sont plus adaptées que les éoliennes à axe horizontal par exemple pour l'intégration au bâtiment ou dans des zones isolées (refuge...).

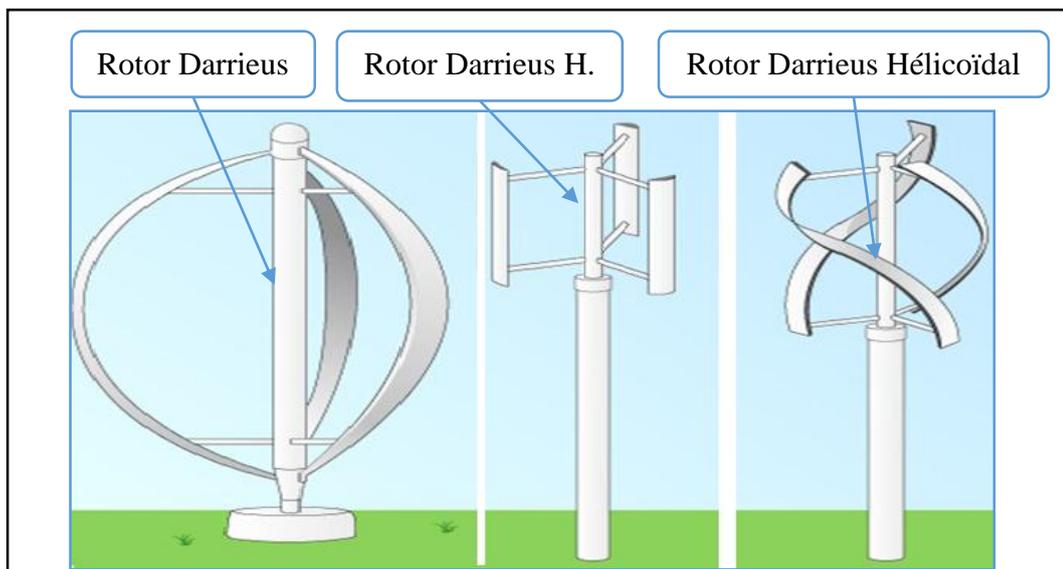


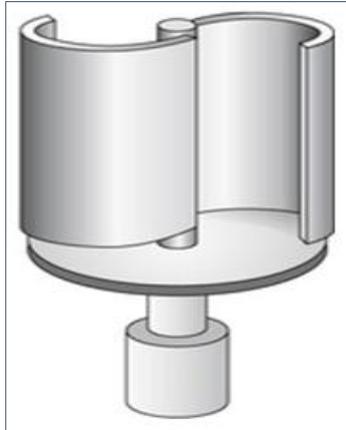
Illustration 15: Eolienne Darrieus

II.3.5.2.2. Le type Savonius

L'éolienne Savonius comporte principalement deux demi cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre. Son principe de fonctionnement est basé sur le principe de la traînée différentielle. Les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes. Il en résulte un couple entraînant la rotation de l'ensemble.

Cette machine présente deux avantages :

- Elle est simple à fabriquer ;
- Elle démarre avec des vitesses de vent de l'ordre de 2m/s.



Source (fr.wikipedia.org)

Illustration 16 : Eolienne Savonius

Tableau 2 : Comparaison des éoliennes à axe horizontal, et à axe vertical

| Types de Turbines | Avantages | Inconvénients |
|----------------------------------|---|--|
| Eoliennes à Axe Horizontal (EAH) | Fort rendement de conversion d'énergie. Accès au vent plus fort Régulation de la puissance via décrochage et calage en cas de vent dépassant les limites nominales | Coût d'installation élevé, mât très dur qui doit supporter le poids de la nacelle. Des câbles plus long du haut de la tour jusqu'au la terre Systèmes d'orientation requis |
| Eoliennes à Axe Vertical (EAV) | Coût d'installation moins important, et maintenance plus facile vu qu'elle est proche de la surface. Fonctionnement indépendant du sens du vent. Adéquat pour les toits de d'immeuble | Rendement moins faible Fluctuation importante du couple et forte vibrations mécaniques Solutions limitées pour la régulation en cas de rafale de vent. |

Source (document éolienne)

II.3.6. Configuration des pales

L'étude portera sur une éolienne tripale. On définit l'angle azimutal $\varphi_i = 120^\circ$ de la pale comme étant l'angle entre l'axe principal de la pale avec l'axe horizontal passant par l'axe du rotor.

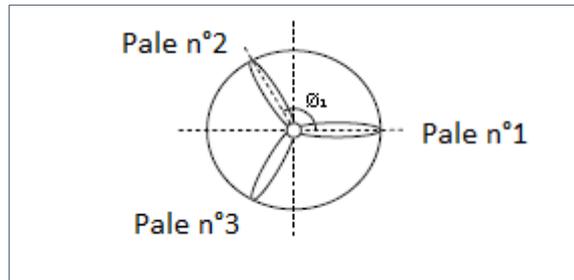


Illustration 17 : Définition de l'angle azimutal (éolienne horizontale)

II.3.6.1. Etude préliminaire de mécanique des fluides

Le but des éoliennes est de transformer l'énergie contenue dans le vent en mouvement de rotation du rotor afin de produire de l'énergie. Avant tout, de manière à avoir une bonne description des charges de vents agissant sur le rotor, il est important de bien cerner les concepts fondamentaux de la Mécanique des fluides à la base de la rotation des pales.

L'énergie dans un fluide est contenue sous quatre formes différentes : potentielle, thermodynamique, cinétique et thermique. Les deux premières formes ont un effet négligeable sur la problématique de notre procédé. A pression constante, seule l'énergie cinétique est extraite du vent. En supposant une vitesse constante le long de la ligne de courant lors du passage à travers les pales du rotor (principe de conservation de la masse), l'énergie est alors extraite par une baisse de pression à travers le rotor. L'air situé juste à l'arrière du rotor possède une pression inférieure à la pression atmosphérique. La surpression au-devant du rotor dévie une part de l'air incident autour de la turbine.

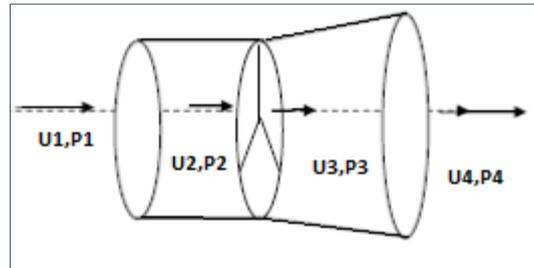


Illustration 18 : Principe de conservation de masse

$$P_2 > P_1 = P_4 > P_3$$

$$U_1 > U_2 = U_3$$

$$P_1 = P_4 = P_{\text{atmosphérique}}$$

Partant du principe qu'une partie de l'air incident est déviée autour du rotor, ceci implique que toute l'énergie contenue dans le vent incident ne pourra être extraite. Albert BETZ fut le premier à déterminer la limite théorique d'efficacité d'une éolienne. Cette limite est connue sous le nom de Limite de BETZ.

Toujours suivant le principe de conservation de la masse, l'apparition d'une surpression en amont du rotor entraîne une réduction de vitesse du vent incident. On peut alors définir le facteur axial d'induction β comme étant la proportion de la réduction de vitesse entre le vent incident et le vent passant à travers le rotor. Il est défini comme suit :

$$\beta = \frac{U_1 - U_2}{U_1} \quad (3)$$

Utilisant le principe de conservation de la masse et le théorème de Bernoulli, les relations suivantes peuvent être déduites :

$$U_2 = U_1(1 - \beta)$$

$$U_4 = U_1(1 - 2\beta)$$

$$\text{Donc } U_2 = \frac{1}{2}(U_4 + U_1) \quad (4)$$

Introduisons maintenant le coefficient de puissance C_p . Il représente le rapport entre l'énergie extraite et l'énergie totale contenue dans le vent. BETZ développa une expression de C_p en fonction du facteur axiale d'induction β :

$$C_p = 4\beta(1 - \beta)^2 \quad (5)$$

Le facteur optimal d'induction est 1/3. Il permet d'atteindre un coefficient de puissance maximale de 16/27 (=0,59)

Un vent opérant à des poussées supérieures (ϕ faible) implique qu'une plus grande quantité d'air est déviée et donc une baisse de l'énergie totale potentiellement exploitable. En revanche, lorsque le coefficient β augmenté, la vitesse du vent passant à travers le rotor diminue et donc l'énergie exploitable fonction de la vitesse au cube aussi.

Cette étude aérodynamique sommaire pose les bases d'importants concepts que l'on doit garder en mémoire.

Elle ne prend cependant pas en compte d'autres facteurs tout aussi importants comme par exemple la forme de la pale de l'éolienne, la rotation du sillon, les choix techniques portant sur la boîte de vitesse, sur l'arbre de transmission.

II.3.6.2. La production possible

Une éolienne produit de l'électricité en fonction de vitesse du vent. Cependant il existe différentes valeurs spécifiques du vent.

- **La vitesse du démarrage** : correspond à la vitesse du vent à partir de laquelle la production commence. En général elle est de l'ordre de 3m/s. Suite à ce début, la production croit en même temps que la vitesse du vent jusqu'à atteindre un plateau qui correspond à la production maximale de l'éolienne. Ce plateau commence pour une vitesse du vent qui est nommée vitesse nominale.
- **La vitesse de survie** correspond à la valeur de vitesse du vent pour laquelle l'éolienne s'arrête grâce à des systèmes de freinage pour éviter qu'elle ne s'endommage. Cette vitesse du vent est généralement de l'ordre de 25m/s.

II.3.7. Fonctionnement de l'éolienne classique

La fonction principale de l'orientation est de maintenir toujours l'hélice en face de la direction du vent. Le principe de fonctionnement de l'éolienne est très simple. C'est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Puis cette énergie est transformée en énergie électrique. Elle est composée d'un mât qui permet de placer le rotor pour permettre son mouvement et d'être entraîné par un vent plus fort qu'au sol.

Une nacelle montée au sommet du mât qui abrite des composants mécaniques, pneumatiques et électriques nécessaires au fonctionnement de la machine. Le rotor comporte généralement 3 pales, est entraînée par l'énergie du vent, est branché au système mécanique qui utilisera l'énergie recueilli.

Il paraît évident que les pales de l'éolienne tournent grâce à la force du vent. Mais cela est plus compliqué qu'il n'y paraît. Une pale d'éolienne marche un peu comme une aile d'avion : lorsque le vent frappe le bord d'attaque de l'aile, cela crée une dépression sur l'extrados de l'aile, et une surpression sur son intrados. En effet, les filets d'air ont une vitesse plus importante sur l'extrados. Cette surpression et cette dépression forment la portance.

Comme les pales de l'éolienne sont en rotation, on doit les vriller pour avoir un angle d'incidence du vent optimal sur les pales. En utilisant ce principe, on peut faire freiner l'éolienne, ainsi que réguler sa vitesse de deux façons :

- **Par décrochage aérodynamique, ou Stall** : dans ce cas, les différentes parties de la pale ne sont pas sollicitées de la même façon : pour un vent faible, c'est la base de la pale qui sera sollicitée, pour un vent fort, c'est son extrémité. Cela nécessite donc une pale très vrillée.
- **Grâce au système de Pitch, ou « pas variable »**, on peut faire pivoter chacune des ailes de l'éolienne de 20°. On peut alors orienter les pales en fonction de la force du vent : les pales sont alors beaucoup moins vrillées.

Rentrons maintenant au cœur de l'éolienne : afin de convertir l'énergie éolienne en énergie électrique, il nous faut un générateur. Il existe deux types de générateurs : synchrone et asynchrone.

Définition des fonctions du service

- Ne pas gêner les riverains
- Résister au milieu extérieur
- Produire de l'électricité exploitable pour l'alimentation des différentes pompes de surface (Eau Brute et de Surface).
- Permettre une implantation aisée
- Produire quel que soit la vitesse du vent
- Ne pas gâcher le paysage

Identifications des contraintes

- Les pompes de surfaces en fonctionnement actuels acceptent- t- elles des variateurs de fréquences ?
- Si on les remplace par des pompes solaires, est-ce que l'alimentation au fil du vent en courant alternatif, est adaptée aux pompes solaires ?
- Il faut choisir des pompes qui admettent des changements de fréquence électrique et maintenant des HMT constantes.
- Il existe des contrôles avec entrée pour éoliennes, solaire et la sortie en AC. Est-t-il possible d'utiliser ces contrôles pour alimenter des pompes solaires à HMT (DHP=Dynamics Head Pressure) fixe et débit variable suivant la variation de vitesse du vent.

PARTIE II

ETUDE DE LA MISE EN ŒUVRE
D'UN NOUVEAU SYSTEME
D'ALIMENTATION DES POMPES
A LA STATION DE PRODUCTION
D'EAU POTABLE DE LA VILLE DE
VOHEMAR

CHAPITRE - III. CALCULS TECHNIQUES

DIMENSIONS ELECTRIQUES

III.1. Données du projet et caractéristiques du site

III.1.1. Données du projet

La station de production en eau potable à ADRORONA dans la commune VOHEMAR se situe à environ 168 km au Nord Est d'Ambilobe. Cette station de pompage comprend deux forages et un puits.

III.1.1.1. Les sources

III.1.1.1.1. Puits

La capacité du puits est de 32 m³/h. Mais le débit d'exploitation recommandé est 11 m³/h ou 2,78 10⁻³ m³/s.

Les caractéristiques de la pompe de la surface du puits sont les suivantes :

- Puissance nominale de 4,5 kW,
- HMT=35m.
- Temps de fonctionnement de pompe de surface entre 22h/jour
- Profondeur (PFR)= 11m

III.1.1.1.2. Les deux forages

La zone des deux forages se situe à 234 m au sud du nouveau réservoir dans le district de Vohemar de la région SAVA. Elle se situe à 860 m environ au Sud-Est du croisement vers SAMBAVA ET VOHEMAR dans le Fokotany d'Androrona. Les points de forages sont répartir dans la zone alluvionnaire aux côté Sud des deux réservoirs pour celui de Vohémar.

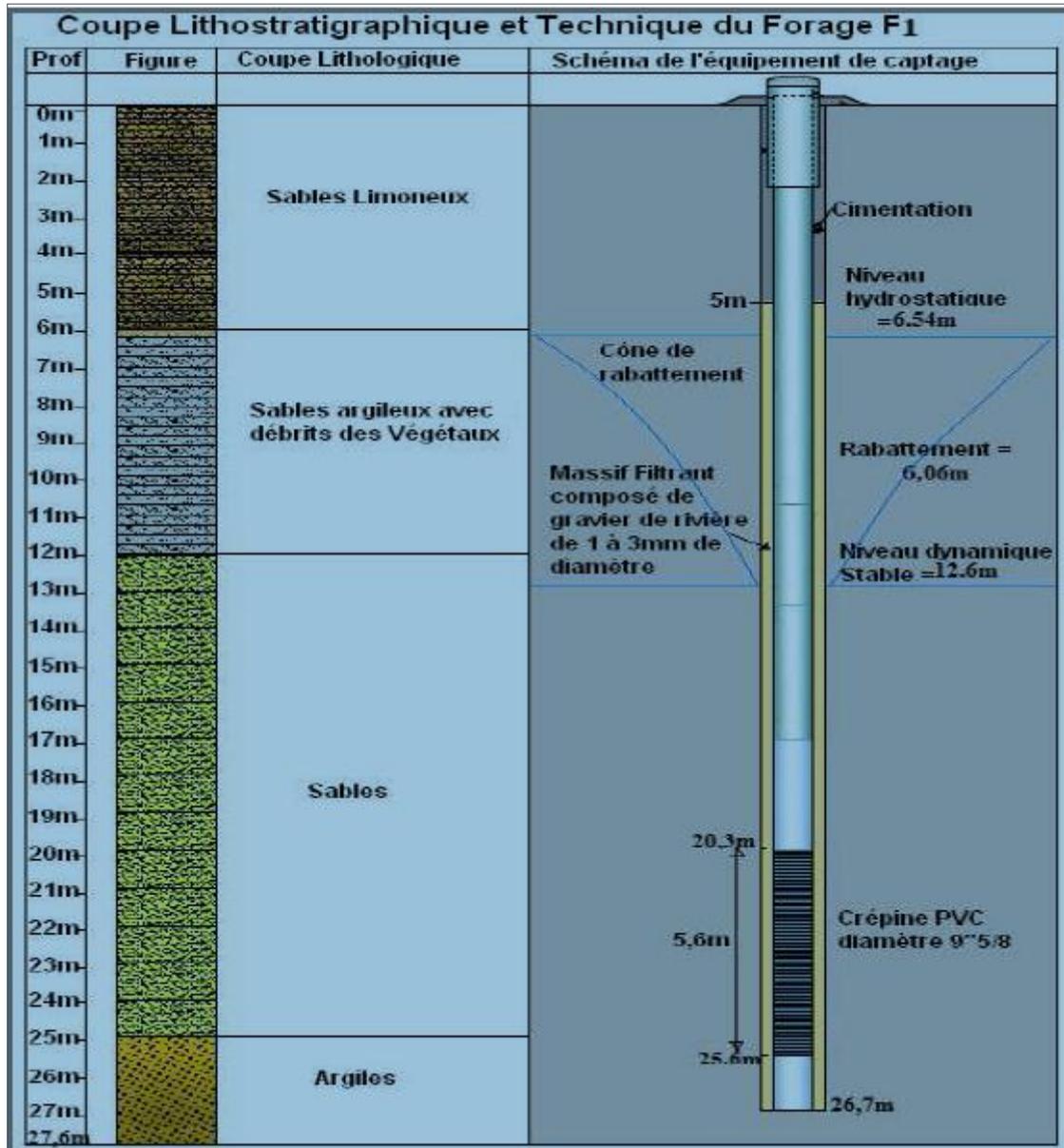
III.1.1.1.3. Forage F1

La capacité du forage F1 est de 9 à 30 m³/h, le débit exploitable recommandé est de 26 m³/h ou 6,39 10⁻³ m³/s.

Les caractéristiques de la pompe immergée du forage F1 sont les suivantes :

- HMT de 45m

- Temps de fonctionnement 22h/jour
- Puissance nominale de 4,9 kW.
- Profondeur (PFR)= 26,60m
- Tubage =PVC DN200 diamètre intérieur a 180mm



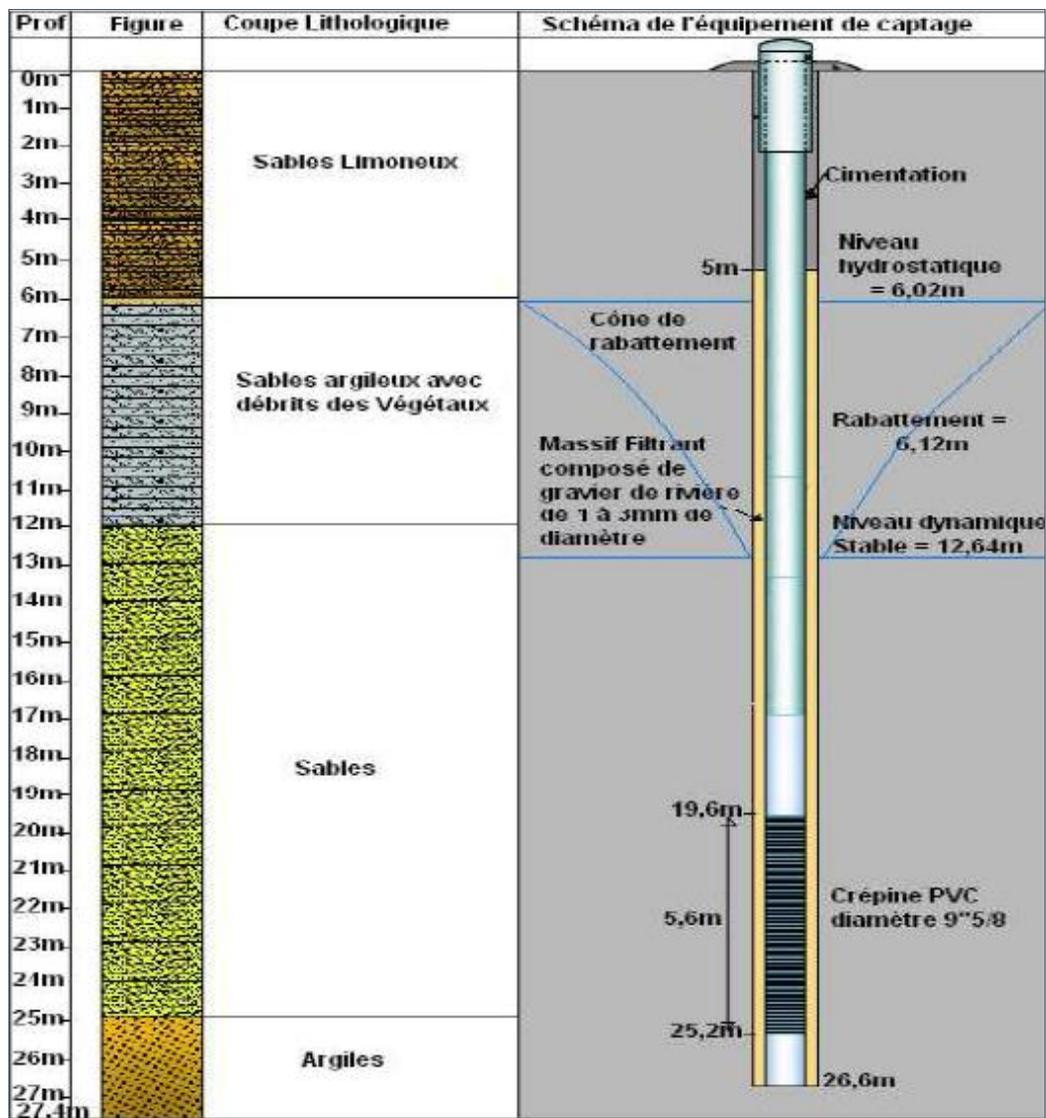
(Source : Rapport des forages réalisés dans le district de VOHEMAR)

Illustration 19 : Coupe litho-stratigraphique et technique du forage F1

III.1.1.1.4. Forage F2

La capacité du forage F2 est de 0 à 16 m³/h, le débit exploitable recommandé est de 12 m³/h ou 2,78 10⁻³ m³/s. Les caractéristiques de la pompe immergée du forage F2 sont les suivantes :

- HMT de 45 m.
- Temps de fonctionnement 23h/jour
- Puissance nominale de 2,4 kW.
- Tubage =PVC DN200 diamètre intérieur a 180mm
- Profondeur (PFR) =26,6 m



(Source : Rapport des forages réalisés dans le district de VOHEMAR)

Illustration 20 : Coupe litho-stratigraphique et technique du forage F2

III.1.1.2. Autres charges existants

Dans la station de la production en eau de vohemar, il existe des autres charges comme :

- Électro pompe agitateur :
 - Marque DOSA PRO ;
 - TYPE : VDB1321S100 ;
 - NUMERO DE SÉRIE : 09020057,
 - $P=0,37KW$. $V=1410tr/min$; $U=380 V$; $\cos\phi=0,7$; poids=7,5kg;
 - Mise en service : 27/01/2001

- Electro pompe GEPS ET1, pompage au refoulement de bêche de reprise vers le réservoir.
 - Pompe centrifuge MEN BLOC : 50/160,
 - NUMERO DE SERIE : 222136,2 ;
 - $Q=50m^3/h$; $H=30m$; $V=2900tr/min$.
 - $P=4kw$; $U=380v$ (Débarrasser et expédie au sous groupement Maevatanana pour secours.
 - Années acquisition 01/01/1998.

- Pompe de capacité 4kw pour le traitement et/ou lavage de filtre

Remarque : Les caractéristiques de chaque pompe se présentent sous forme de tableau dans l'annexe 8.

Les capacités des trois sources c'est-à-dire puits et deux forages donnés ci-dessus sont exploités dans leurs capacités maximales donc si on dépasse ces valeurs données, la sonde de niveau bas coupe l'alimentation électrique et déclenche l'arrêt de la pompe.

L'objectif est de maîtriser le fonctionnement de l'éolienne pour optimiser la fourniture en eau dans le réseau d'adduction. La problématique est de calculer le volume d'eau que pourra fournir l'éolienne suivant les conditions requises.

III.1.2. Caractéristiques du site d'étude

III.1.2.1. Étude des besoins en eau VOHEMAR

III.1.2.1.1. Définition des besoins

Nombre de population 15 000 habitants en 2010. La ville compte actuellement 722 abonnés, tout compris (particuliers, administration, collectivité)

III.1.2.1.2. Besoin en eau journalière

Dans ce cas particulier de VOHEMAR, le besoin actuel en eau pour desservir la population est de 850 m³/jours. Etant donné que le système fonctionne au fil du vent et que la production est limitée à des débits nominaux de chaque pompe donnée ci-dessus. L'accroissement de la demande n'est pas possible car si les capacités des sources (puits, forage F1, forage F2) dépassent ces valeurs, la sonde de niveau bas déclenche l'arrêt des pompes.

III.1.2.1.3. Temps de fonctionnement

Les périodes de fonctionnement seront à considérer :

Tableau 3: Temps de pompage avec les débits (fonctionnement actuel)

| | Puits | Forage 1 | Forage 2 | Total débit produit (m ³ /j) |
|------------------------------------|-------|----------|----------|---|
| Temps de pompage (h/j) | 15 | 22 | 20 | 977 |
| Débit nominale (m ³ /h) | 11 | 26 | 12 | |
| Débit refoulé (m ³ /j) | 165 | 572 | 240 | |

D'après ce tableau, le débit refoulé par les trois pompes est 977 m³/jour. Mais le besoin journalier actuellement est 850 m³/jour.

III.1.2.2. Energie hydraulique nécessaire

Suivant les statistiques de la JIRAMA, les données techniques sont les suivantes :

- E=5MWh/mois en 2016 (énergie consommée mensuellement (cf. Annexe 12)
- E=7MWh/mois en 2015 (énergie consommée mensuellement (cf. Annexe 12)

III.1.3. Calculs des besoins en énergie

Le tableau suivant montre l'énergie consommée par jour de la station de production en eau potable de la ville de Vohemar.

Tableau 4: l'énergie consommée par jour

| Charge | Puissance en kW | Temps de marche en h | Energie en kWh |
|------------------------|-----------------|----------------------|----------------|
| Pompe Puits | 4,5 | 22 | 99 |
| Pompe forage F1 | 4,9 | 22 | 107,8 |
| Pompe forage F2 | 2,4 | 23 | 55,2 |
| Electropompe agitateur | 0,37 | 2 | 0,74 |
| Pompe d'oseuse | 4 | 22 | 88 |
| Ampoules | 0,23 | 12 | 2,76 |
| Résistance | 2 | 10 | 20 |
| Groupe électrogène | 16 KVa | | |
| Consommation totale | 18,4 | | 373,5 |

L'énergie = la puissance * heure de marche

La puissance totale des matérielles installée pour la station de pompage d'Androrona est environ de **18,4 kW** et l'énergie consommée dans la journée c'est **373 kWh**

III.2. Dimensionnement d'une installation éolienne

III.2.1. Note théorique de calcul

III.2.1.1. Puissance fournies par la pompe

La pompe fourni deux sortes de puissances :

- La puissance hydraulique qui est la puissance théorique,
- La puissance utile, qui est la puissance réellement fournie par la pompe.

La puissance hydraulique est la puissance fournie par la pompe pour remonter l'eau à une hauteur voulue. Elle s'exprime par la relation suivante :

$$P_h = \gamma * Q * H \quad (6)$$

Où Q : débit passant par la pompe

γ : Poids volumique de l'eau ; (N/m³)

H : la hauteur manométrique totale ou HMT (m)

III.2.1.1. Puissance théorique d'éolienne

Le vent est un paramètre difficile à mesurer. En effet, il y a plusieurs facteurs qui le caractérisent : sa vitesse, sa direction, l'effet de la rugosité du sol, l'effet des obstacles, l'effet de la stabilité de l'atmosphère... C'est pourquoi, nous nous intéresserons à un cas idéal où seules la vitesse et la direction du vent seront prises en compte.

Pour les éoliennes classiques, il y a une perte d'énergie variant de 35 à 40% pour les éoliennes industrielles jusqu'à 50 à 70% pour les éoliennes commerciales. Il y a donc une perte énorme d'énergie, puisque les éoliennes industrielles ne peuvent fournir que 60 à 65% de leur puissance théorique maximale et les éoliennes commerciales que 30%.

Les éléments qui déterminent la puissance de sortie (kWh) d'une éolienne sont

- La vitesse du vent
- Le diamètre du rotor
- La masse de l'air
- Le nombre et la forme de pales le rendement mécanique du rotor vers l'axe de la génératrice
- La limite de Betz

Le nombre et la forme de pales donneront une plage d'utilisation optimum (rendement selon telle ou telle vitesse de vent). L'éolienne tire son énergie de l'énergie cinétique du vent. L'énergie cinétique du vent dépend de sa masse et de son volume :

$$E_C = \frac{1}{2} M * V^2 \quad (7)$$

E_C : Énergie en joule

V vitesse du vent en m/s

Pour cela il faut trouver la masse du volume d'air, qui est caractérisée par la formule

$$M = \rho * V * S \quad (8)$$

M : le débit massique en kg

ρ Masse volumique, en kg/m³

S surfaces du dispositif en m²

Il s'agit d'un mélange des 2 formules

$$E_C = \frac{1}{2} * \rho * S * V^3 \quad (9)$$

Heureusement on a encore une autre formule

$$E = P * t \quad (10)$$

T temps en seconde

P : Puissance en watts

La puissance maximale (t=1h) susceptible d'être recueillie sur les éoliennes lentes s'exprime approximativement en fonction du diamètre de la roue D et de la vitesse du vent V par la relation suivante

$$P = 0,15 * D^2 * V^3 \quad (11)$$

La puissance théorique développée par la pompe sera égale à la puissance fournie par l'éolienne

$$P_{max} = P_{pth} = Q * \gamma_e * h \quad (12)$$

Avec $\gamma_e=9800\text{N/m}^3$ poids volumique de l'eau

D : Diamètre du rotor de la machine

V : Vitesse moyenne du vent, m/s

ρ : Densité de l'air, kg/m^3

III.2.1.2. Energie éolienne

III.2.1.2.1. Energie éolienne disponible

On considère une colonne d'air de longueur dl , de section S , de masse volumique ρ animée d'une vitesse V conformément à la figure suivante :

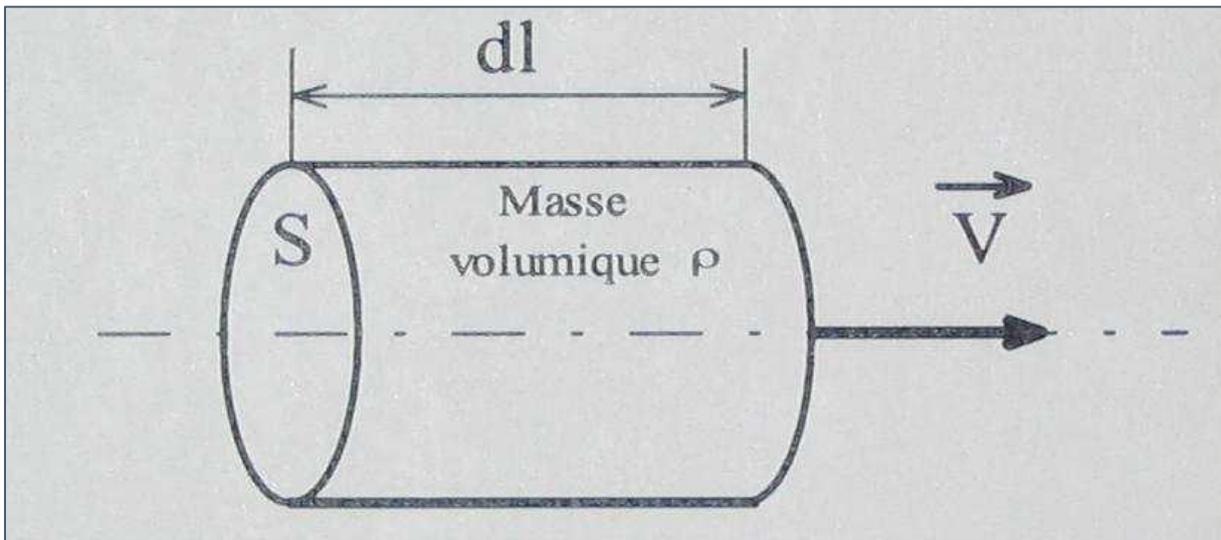


Illustration 21 : Colonne d'air

L'énergie cinétique de cette colonne d'air est donc :

$$dW_c = \frac{1}{2} dm V^2$$

Avec $dm = \rho S dl$

Or nous savons que $dl = V dt$ car $V = \frac{dl}{dt}$ D'où : $dW_c = \frac{1}{2} \rho S V^3 dt$ (13)

On en déduit ainsi l'expression de la puissance disponible :

$$P_a = \frac{dW_c}{dt} = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (14)$$

La puissance disponible par m^2 devient alors :

$$P_a = \frac{1}{2} \rho S V^3$$

La puissance disponible maximale s'obtient lorsque l'énergie cinétique de rotation de l'air après passage au niveau de l'éolienne est faible, c'est-à-dire pour une forte vitesse angulaire de rotation ω et un faible couple sur l'arbre.

Remarque : Nous rappelons que la vitesse angulaire de rotation ω se définit par

$\omega = 2 \pi n$ avec n le nombre de tours par seconde.

Avant de dimensionner les installations, on veut connaître la vitesse du vent pour avoir une quantité d'eau optimal. En d'autres termes, on définit les besoins en eau et éventuellement les prévisions de la demande en tenant compte des évolutions de la croissance des abonnés.

III.2.1.2.2. L'énergie récupérable

On définit un coefficient de performance C_p propre à chaque éolienne, comparable au rendement d'un moteur thermique, qui dépend directement des caractéristiques de l'éolienne. Ainsi ce coefficient de performance varie avec le vent. La puissance récupérable P_r sur l'éolienne est alors définie par :

$$P_r = C_p P_d \quad (15)$$

Où P_d est la puissance disponible.

Cette figure montre la variation de C_p en fonction de la vitesse du vent



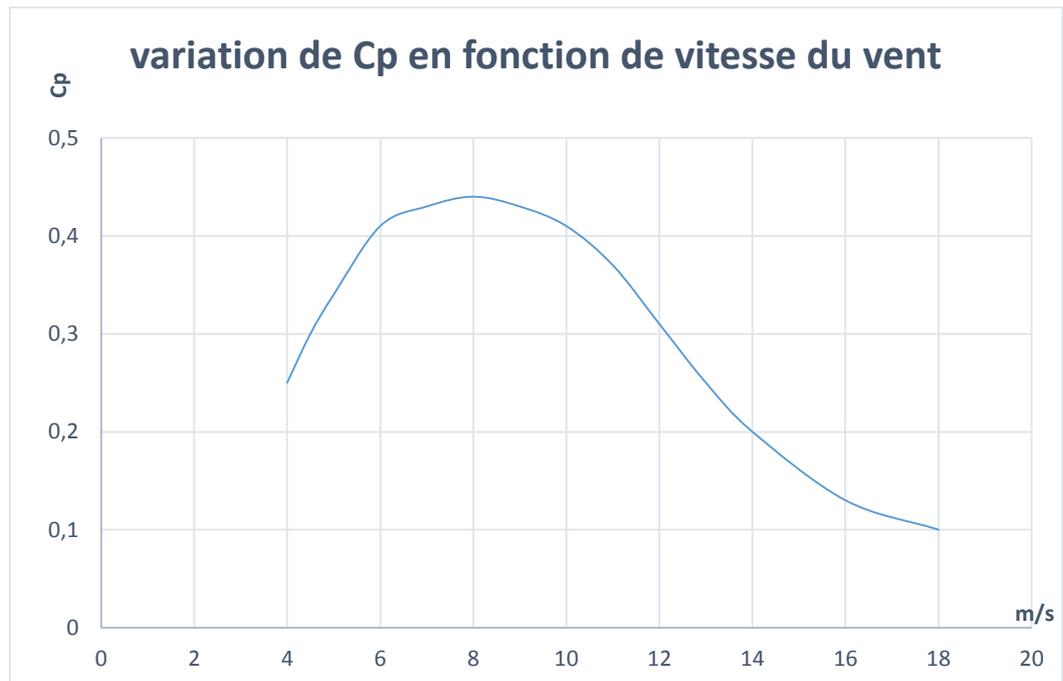
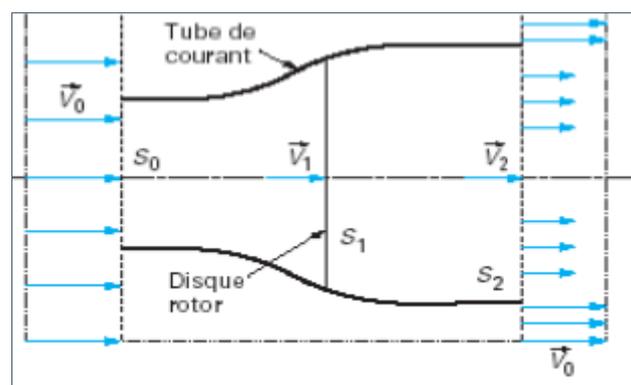


Illustration 22 : Variation de C_P en fonction de vitesse du vent

III.2.1.2.2.1. La théorie de BETZ

La production d'énergie se fait par prélèvement d'énergie cinétique à la traversée de l'aéromoteur.



Source : Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique

Illustration 23 : Veine de vent à la traversée de l'aéromoteur

Avec :

V_0 : vitesse axiale initiale du vent

S_0 : surface à l'entrée du tube de courant

V_1 : vitesse du vent dans le plan du rotor

S_1 : surface du rotor

V_2 : vitesse du vent à l'aval du rotor

S_2 : surface à l'aval du rotor

Masse d'air

A une pression atmosphérique normale et à une température de 15 degrés Celsius, l'air pèse environ 1,225 kg par mètre cube. Cependant, la densité diminue un peu lorsque l'humidité de l'air augmente.

Une masse d'air m est donnée par la relation :

$$m = \iiint \rho \, dv \quad (16)$$

Or, mathématiquement :

$$\frac{dm}{dt} = \iiint \frac{\partial \rho}{\partial t} \, dv + \iint \rho \vec{V} \vec{n} \, ds \quad (17)$$

Dans le cas où ρ constant, la relation devient :

$$0 = \iint \rho \vec{V} \vec{n} \, ds$$

On va supposer que V est constante à travers une section droite, donc

$$0 = \rho (\int_{S_1} \vec{V} \vec{n} \, ds + \int_{S_2} \vec{V} \vec{n} \, ds)$$

\vec{n} est un vecteur normal même sens que le sens du fluide, l'équation devient :

$$0 = \rho (-S_1 V_1 + S_2 V_2)$$

Dans le cas où ρ constant, ce qui permettra d'écrire la conservation du débit volumique :

$$S_0 V_0 = S_1 V_1 = S_2 V_2 \quad (18)$$

Le théorème d'Euler (variation de la quantité de mouvement de la veine de vent entre l'amont et l'aval de l'hélice) permet d'écrire que la force F s'exerçant sur les pales de l'aéromoteur est donnée par l'expression :

$$F = \rho S_1 V_1 (V_0 - V_2) \quad (19)$$

On obtient ainsi l'expression de la puissance mécanique fournie à l'aéromoteur :

$$P = FV_1 = \rho S_1 V_1^2 (V_0 - V_2) \quad (20)$$

De plus, la masse d'air élémentaire dm traversant l'éolienne pendant le temps dt est :

$$dm = \rho S_1 V_1 dt \quad (21)$$

La variation d'énergie cinétique de cette masse dm lorsque la vitesse passe de la valeur V_0 à la valeur V_2 est défini par :

$$dW_c = \frac{1}{2} dm (V_0^2 - V_2^2) \quad (22)$$

La variation de l'énergie cinétique par seconde de la masse d'air est :

$$P_c = \frac{dW_c}{dt} = \frac{1}{2} \rho S_1 V_1 (V_0^2 - V_2^2) \quad (23)$$

En exprimant que $P_c = P_r$, on en déduit que :

$$V_1 = \frac{V_0 + V_2}{2} \quad (24)$$

Ainsi la puissance récupérable selon la théorie de BETZ s'énonce :

$$P_r = \frac{1}{4} \rho S_1 (V_1 + V_2)^2 (V_0 - V_2) \quad (25)$$

$$P_{dispo} = P_{récup} + P_{sortant} \quad (26)$$

III.2.1.2.2.2. La limite de BETZ

La relation devant exister entre V_0 et V_2 pour que cette puissance P_r passe par un maximum soit :

$$\frac{dP_r}{dV_r} = 0 \quad (27)$$

$$\text{Soit } V_0 = 3V_2$$

Le théorème de BEZT montre que le maximum d'énergie récupérable est **16/27** de l'énergie théorique. Ce qui donne la formule suivante :

$$P_{max} = \frac{8}{27} * S * V_0^3 \rho = \frac{16}{27} * \frac{1}{2} * \rho * S * V_0^3$$

$$P_{max} = \frac{16}{27} P_d \quad (28)$$

$\frac{16}{27}$ Théorème de BEZT

$\rho = 1,238 \text{ Kg/m}^3$: Masse volumique de l'air à 12°C

Ce qui signifie que **la puissance maximale récupérable ne pourra jamais représenter plus de 59,26% de la puissance disponible due au vent**, c'est la limite de Betz.

En réalité la puissance récupérée est inférieure à cette puissance maximale car « du vent à l'ampoule », ou « du vent au réseau électrique » à l'échelle nationale il y a plusieurs étapes de conversion d'énergie, chacune avec son propre rendement (par exemple le rendement d'une hélice est d'environ 85%). De plus, en pratique tous les organes ne sont pas à leur rendement maximum en même temps, ce qui réduit encore le rendement global.

Ainsi une éolienne industrielle aura un rendement global compris entre 50 et 55%, une éolienne artisanale entre 25 et 40%.

III.2.2. Choix de machine (éolienne)

On choisit l'éolienne PERFEO-20000 qui a une puissance nominale de 20000 Watts permettant de couvrir les besoins en énergie dans la station de production en eau de Vohemar. Avec plus de 24 000 kWh de production annuelle, la PERFEO-20000 est la solution idéale pour les gros consommateurs d'électricité. Sa faible vitesse de démarrage et son système de détection automatique des vents lui permettent d'optimiser le potentiel éolien du site au maximum. Elle peut être raccordée au réseau afin de revendre sa production.

III.2.2.1. Les caractéristiques de l'éolienne

Les caractéristiques de cette machine sont représentées par le tableau ci-dessous

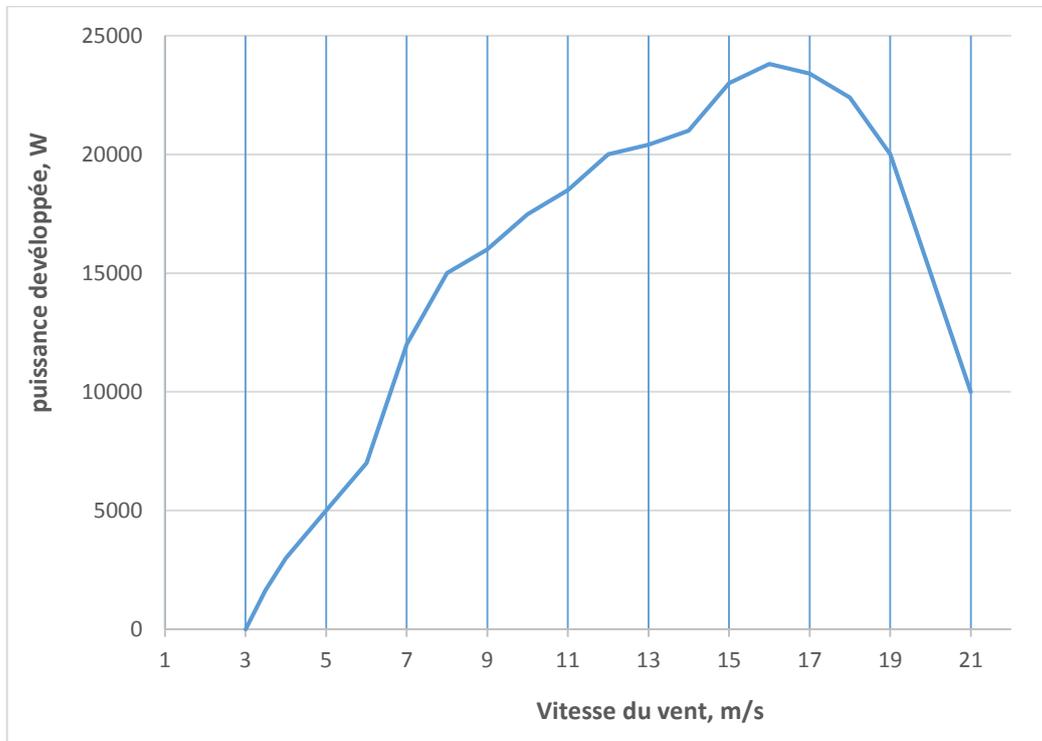
Cette éolienne 20 kW PERFEO-20000 produit **24 000 kWh** par an.

Tableau 5: Eolienne 20 kW PERFEO-20000

| | | |
|--|--|--|
| Puissance nominale | 20 kW |  |
| Puissance maximale | 22 kW | |
| Tension de sortie (après redresseur) | 360 V DC | |
| Aérogénérateur | Alternateur triphasé à aimants Permanents | |
| Vitesse de démarrage | 3 m/s | |
| Vitesse nominale de la génératrice | 12 m/s | |
| Vitesse maximale (Avant mise en protection) | 25 m/s | |
| Vitesse optimale du rotor | 160 tours/min | |
| Diamètre du rotor | 9,93 m | |
| Frein du rotor | Manuel, freinage électrique | |
| Nombre de pales | 3 | |
| Matériau des pales | | |
| Poids de la nacelle avec les pales | 1350 kg | |
| Réducteur de transmission | Non, transmission directe | |
| Orientation de la génératrice | Automatique par girouette | |
| Protection ouragan | Automatique | |
| Tailles de mât | 19 m | |
| Types de mât | Tubulaire haubané ou conique autoporteur | |
| Onduleur | Tension sinusoïdale Monophasée 230 V AC 50 Hz ou triphasée 400 V AC 50 Hz | |
| Production annuelle moyenne | 24 000 kWh | |

III.2.2.1. Courbe de puissance

La courbe de puissance est un graphe représentant la puissance de sortie d'une éolienne à des vitesses de vent différent. Cette courbe caractérise les données dans le tableau ci-dessus.



Source : Éolienne PERFEO 20000

Illustration 24 : Courbe de puissance PERFEO 20000

III.2.3. Adaptation de l'éolienne PERFEO-20000 à Madagascar

Si on fait la moyenne des données de la vitesse du vent obtenu au sein de service météorologie d'Ampanrianomby et Wind Finder, on obtient la vitesse moyenne du vent à 10 m de haut représentés par le tableau ci-dessous.

Tableau 6: Vitesse moyenne du vent (météo et windfinder) et puissance obtenue par la courbe de puissance PERFEO 20000

| | Janv. | Fév. | Mars | Avr. | Mai | Juin | Juill. | Août | Sept | Oct. | Nov. | Déc. |
|---|--------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| Vitesse du vent à 10 m de haut | 4,60 | 3,59 | 4,56 | 5,24 | 6,11 | 6,80 | 7,44 | 8,06 | 7,50 | 6,55 | 5,05 | 4,24 |
| Vitesse du vent à 19 m de haut | 5,94 | 4,64 | 5,89 | 6,77 | 7,90 | 8,79 | 9,62 | 10,41 | 9,70 | 8,47 | 6,53 | 5,49 |
| Puissance fournie par l'éolienne en kW | 7,00 | 4,50 | 7,00 | 9,50 | 14,00 | 16,00 | 17,00 | 17,80 | 16,80 | 15,50 | 10,00 | 6,80 |

Les vitesses du vent représentés dans ce tableau sont obtenues par la moyenne des vitesses du vent météo et Wind Finder (cf. annexe 1 et 2) et les puissances sont obtenus par la courbe de puissance. Les vitesses à 19 m de haut sont obtenues par la formule (1).

α : dit coefficient de cisaillement avec $\alpha = 0,4$ (intermédiaire de gazon coupée et forêt).

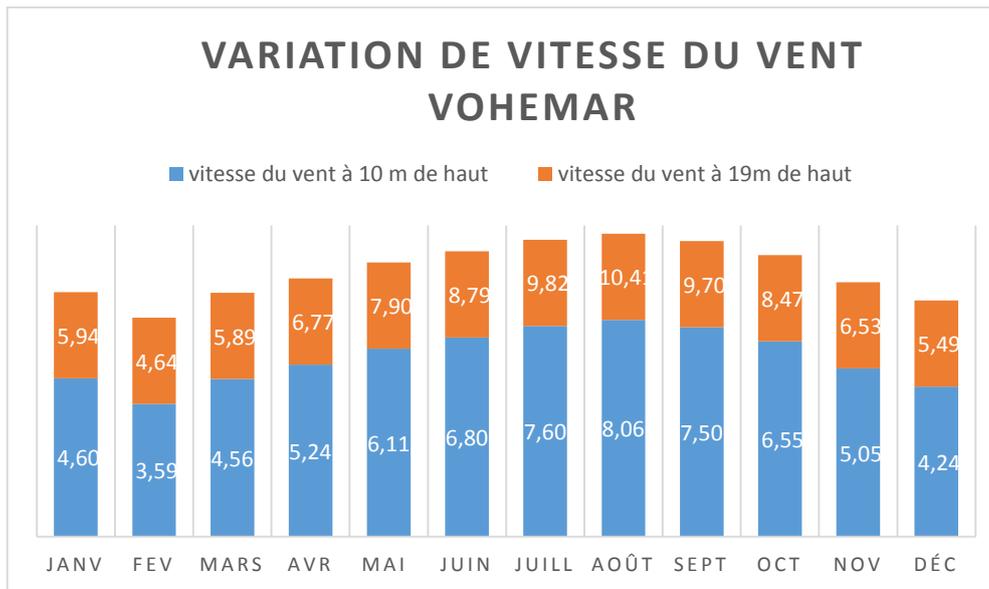


Illustration 25 : Diagramme des vitesses

III.2.4. Transmission mécanique

Il est nécessaire d'accorder la vitesse de rotation du rotor aux exigences du convertisseur ; ses composants peuvent varier énormément en coût et complexité. Sauf pour des rotors relativement petits, entraînant des génératrices à faible vitesse, on a besoin d'augmenter la vitesse de rotation de l'arbre de transmission.

De nombreuses méthodes ont été envisagées pour transmettre l'énergie mécanique: courroies synchrones et trapézoïdales, transmission à chaîne, prise directe, systèmes hydrauliques, multiplicateur et boîte de vitesse. Le multiplicateur de vitesse sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique. En effet, la faible vitesse de rotation de l'éolienne ne permettrait pas de générer du courant électrique dans de bonnes conditions avec les générateurs de courant classiques.

Aucun de ces systèmes ne convient spécialement aux aérogénérateurs. Le système de transmission finalement adopté est généralement le résultat de compromis techniques et économiques pour la réalisation de l'ensemble complet.

III.2.5. Choix des convertisseurs ou onduleurs (AC/DC-DC/AC) -U et I

Un convertisseur permet de transformer le courant continu stocké dans une batterie ou produit par un générateur de courant (panneaux solaire, photovoltaïques, éolienne, hydro-turbine), en courant alternatif qui peut ensuite être utilisé ou réinjecté sur le réseau de distribution électrique. Si l'installation utilise des appareils fonctionnant en courant alternatif(AC), il est alors nécessaire de convertir le courant continu que produit le générateur, en courant alternatif compatible et utilisable par ces appareils.

L'éolienne fournit des courants alternatifs mais son moteur a besoin de fréquence constante donc on fait convertir le courant alternatif en courant continu, de plus on fait reconverter ce courant continu en courant alternatif pour être utilisable par les matérielles tournantes. On utilise de convertisseur à doubles entrées (l'une pour l'éolienne et l'autre pour le solaire).

Remarque : Mais il y a aussi de convertisseur uniquement pour l'éolienne.

III.2.5.1. Choix du convertisseur

La première étape pour choisir un convertisseur (système d'alimentation ininterrompue) en fonction de sa puissance, est de connaître la charge totale à protéger et les objectifs de croissance de cette charge à l'avenir.

$$P_a = S \times \cos\varphi \quad (29)$$

$$\text{Donc } S = \frac{P}{\cos\varphi} \quad (30)$$

Avec $\cos\varphi = 0,8$

On choisit alors un convertisseur pour chaque pompe :

- Pour la pompe du puits : $S_1 = 5,63 \text{ KVA}$
- Pour la pompe du forage F1: $S_2 = 6,13 \text{ KVA}$
- Pour la pompe du forage F2 : $S_3 = 3 \text{ KVA}$

III.2.5.2. Caractéristique de chaque convertisseur

III.2.5.2.1. Pour la pompe du puits

L'onduleur hybride Effekta WKS 5630VA 48V est un combi convertisseur pur sinus, régulateur solaire MPPT et chargeur de batteries qui offre de multiples possibilités. Cette onduleur peut fonctionner dans des applications en site isolé grâce à l'énergie du vent mais est également adapté à un fonctionnement sur un groupe électrogène ou en complément du réseau électrique grâce à son entrée 230V AC.

En fonction de la programmation choisie, si l'éolienne ne produit pas assez d'énergie, l'onduleur pourra faire le complément en puisant dans les batteries ou sur le réseau électrique afin de pouvoir fournir la puissance nécessaire aux consommateurs. L'onduleur hybride WKS peut aussi être configuré dans des applications électriques en triphasé. Les détails de ces caractéristiques sont dans l'annexe 3.



Illustration 26 : Onduleur hybride Effekta WKS 5630VA 48V

III.2.5.2.2. Pour la pompe du forage F1

Le convertisseur qui correspond à cette pompe est SPW 6000. Cette convertisseur est caractérisée par :

- Diagnostic évolué (états, mesures, alarmes disponibles sur écran LDC custom)

- Niveau de bruit très faible (<40 dBA) : pour une installation dans n'importe quel environnement, et ce grâce à la ventilation à contrôle numérique qui dépend de la charge appliquée.
- Auto-restart (automatique au rétablissement du réseau, programmable par le logiciel ou par synoptique). Les détails de ces caractéristiques sont dans l'annexe 4.

En mode normal, l'onduleur est placé entre le réseau et la charge. La puissance fournie aux consommateurs transite en permanence par l'UPS qui réalise une double conversion alternatif/continu - continu/alternatif.

En mode autonome, l'onduleur et la batterie assurent l'alimentation de la charge. Cette configuration est la plus coûteuse, mais aussi la plus complète au point de vue de la protection de la charge. L'onduleur transforme en permanence la tension fournie par le réseau, ce qui permet une régulation précise de la tension et de la fréquence de sortie. Vu l'isolement des consommateurs par rapport au réseau, les perturbations du réseau électrique sont éliminées à la sortie de l'UPS. De plus, le passage du mode de fonctionnement normal au mode autonome s'effectue instantanément. L'UPS redirige la charge vers le réseau via un contacteur statique de dérivation, dans l'éventualité d'une défaillance de l'UPS ou avant la fin d'autonomie de ses batteries. L'UPS est synchronisée avec le réseau de dérivation, ce transfert s'effectue sans coupure. Cet UPS est la meilleure protection pour les appareillages sensibles aux perturbations et microcoupures. Les détails de ces caractéristiques sont dans l'annexe 4.



Illustration 27 : Onduleur UPS 6,13 KVA

III.2.5.2.3. Pour la pompe du forage F2

On choisit le convertisseur 230V WKS 3KVA-24V pour la pompe du forage F2.

- Puissance 2,4 kW ou 3 kVa
- Convertisseur Pur Sinus (idéal pour les appareils sensibles ou ayant besoin d'un fort courant de démarrage) : ce convertisseur est un onduleur a tension sinusoïdale pure (Pur Sinus) qui reproduit un courant de qualité similaire à celui du réseau public. Il peut être utilisé pour alimenter tous les types d'appareil
- Sans transformateur
- Protection contre la surchauffe, les inversions de polarité DC et les court circuits
- Protection des batteries avec alarme et déconnection en cas de batterie basse
- Autoconsommation très faible.

Les détails de ces caractéristiques sont dans l'annexe 5.

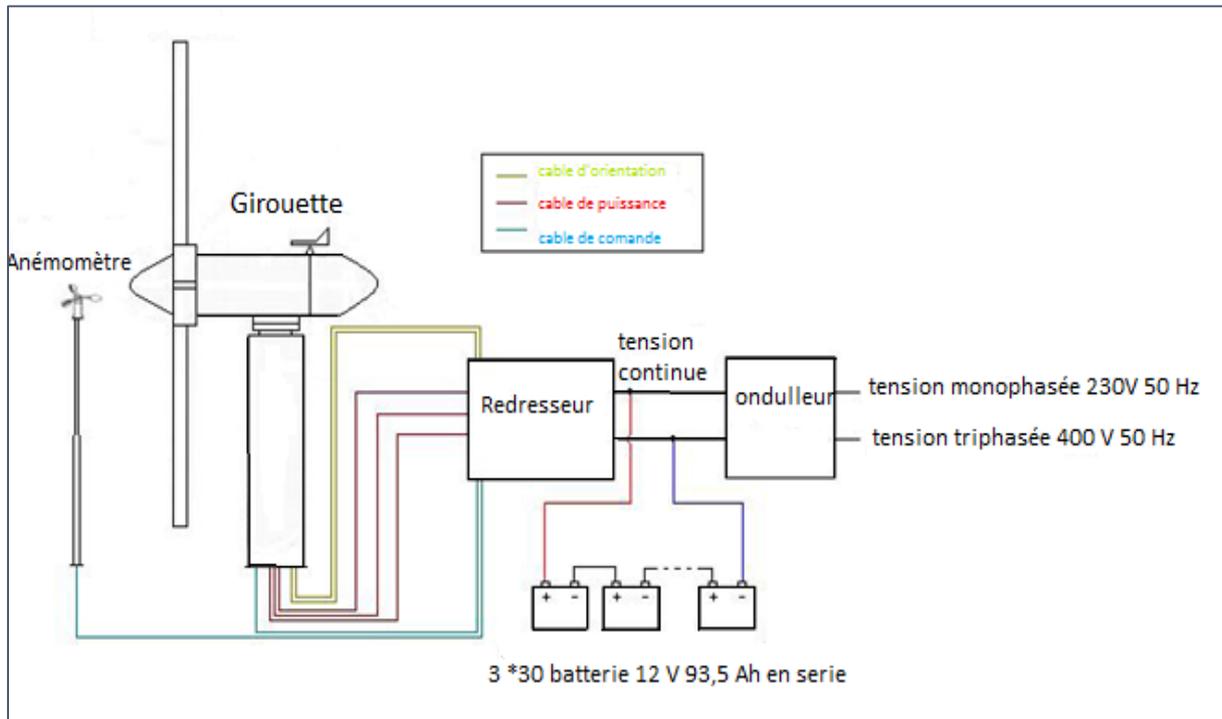


Illustration 28 : Onduleurs avec transformateur d'isolement

N.B : Ne pas placer le convertisseur (ou onduleur) au même endroit que la batterie, car les vapeurs d'acides dégagées peuvent corroder les éléments électroniques du convertisseur ; de plus, la commutation du convertisseur peut, dans certains cas, s'avérer dangereuse. Il vaut donc mieux, quand cela est possible, aérer l'endroit qui abrite la batterie.

III.2.5.3. Schéma de connexion en autoconsommation

On représente le schéma de connexion en autoconsommation de cette installation par le schéma ci-dessous.



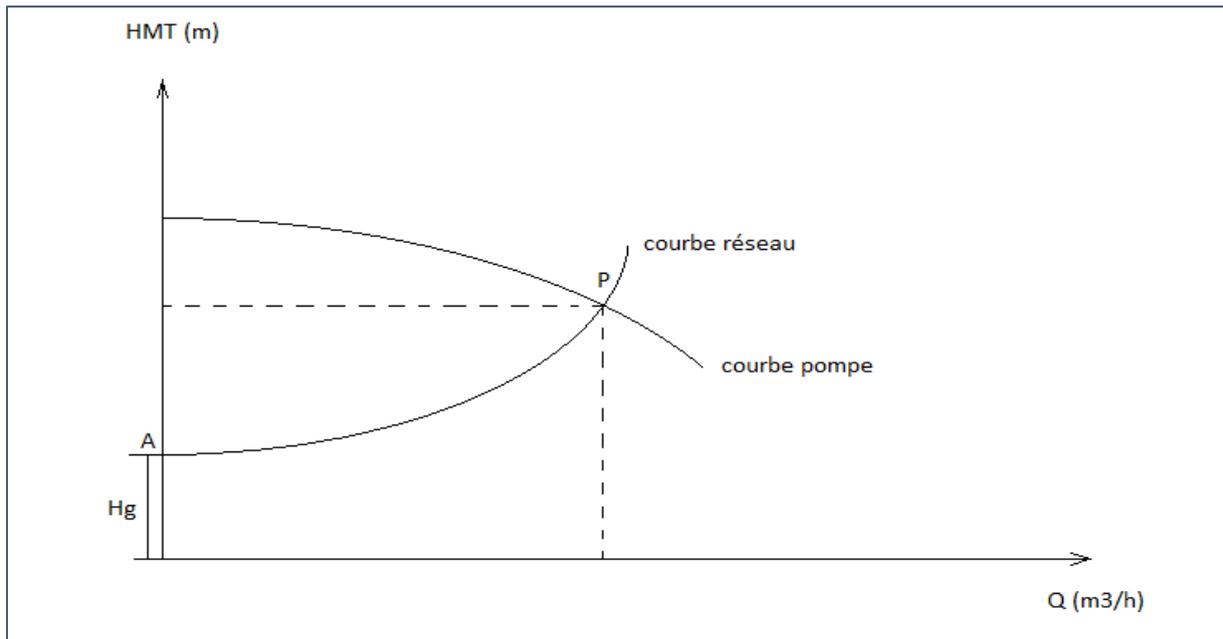
Source : Éolienne PERFEO 20000

Illustration 29 : Connexion en autoconsommation (Éolienne PERFEO 20000)

III.2.6. Choix des pompes solaires

III.2.6.1. Pompe classique

La courbe caractéristique d'une pompe classique est caractérisée par un point de fonctionnement fixe (intersection de la courbe pompe et courbe réseau) qui est représentée par l'illustration ci-dessous.



Source : cour Mr.RANDRIANASOLO David

Illustration 30 : Courbe pompe classique

P : Point d'intersection de la courbe pompe et courbe réseau à une hauteur H ou point de fonctionnement fixe

$$HMT = H_g + \Sigma \text{ perte de charge} \quad (31)$$

III.2.6.2. La courbe caractéristique de la pompe de surface du puits

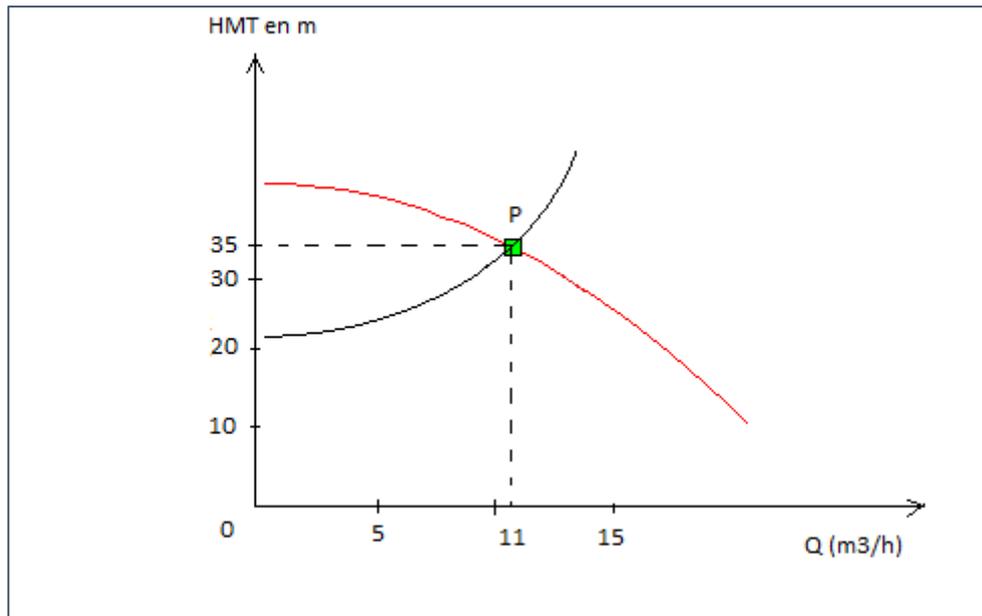


Illustration 31: Courbe pompe de surface du puits

P point de fonctionnement de la pompe du puits qui a des coordonnées (11 ; 35)

III.2.6.3. La courbe caractéristique de la pompe immergée du forage F1

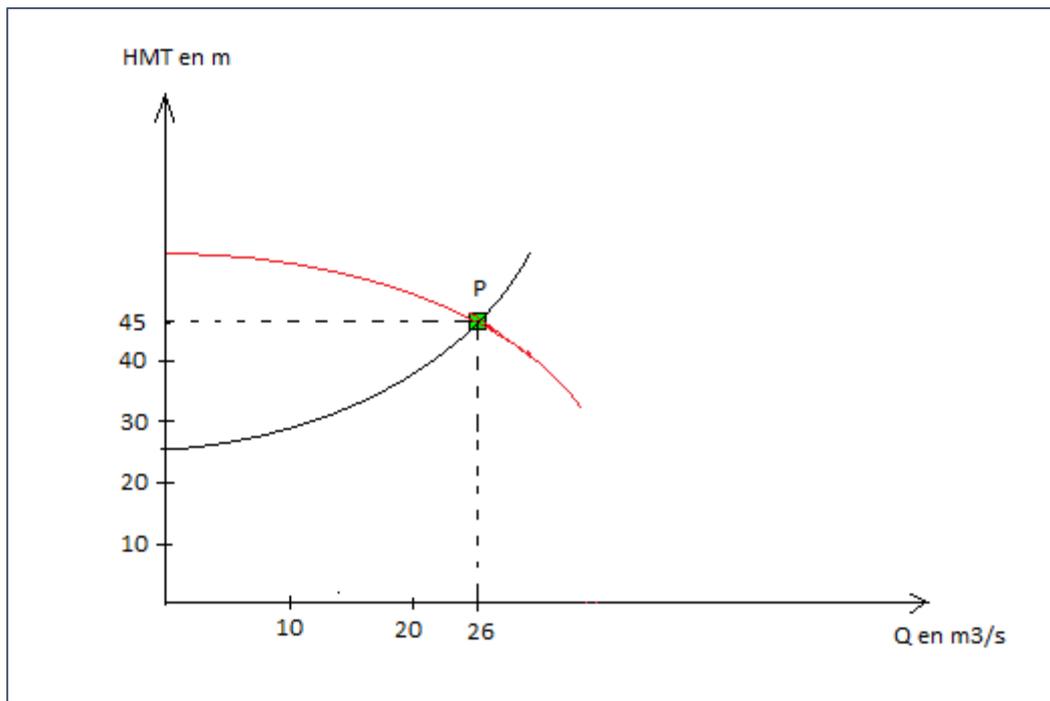


Illustration 32: Courbe pompe immergée du forage F1

P point de fonctionnement de la pompe F1 qui a des coordonnées (26 ; 45)

III.2.6.4. La courbe caractéristique de la pompe immergée du forage F2

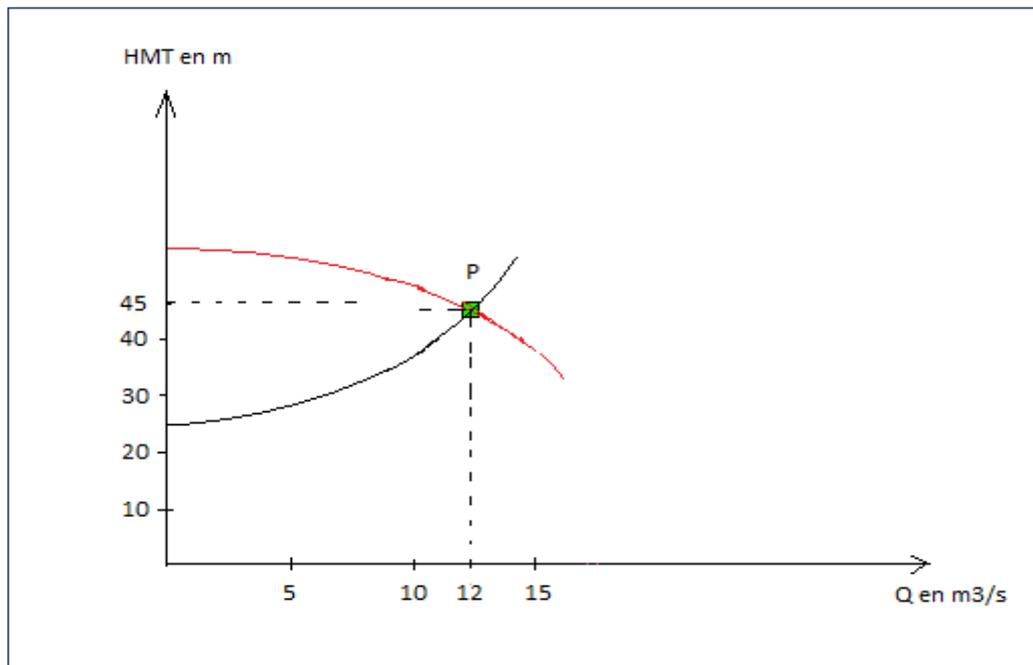
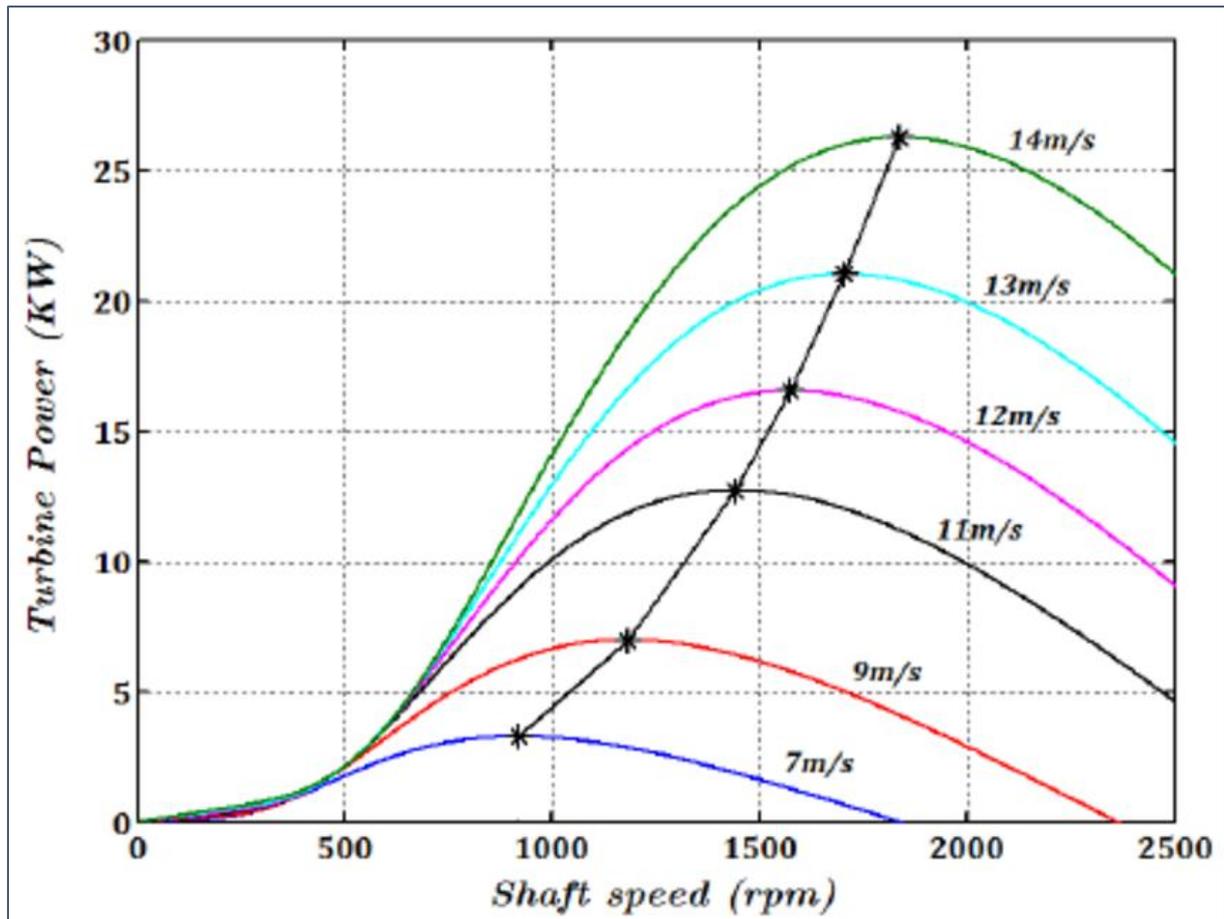


Illustration 33: Courbe pompe immergée du forage F2

P point de fonctionnement de la pompe F2 qui a des coordonnées (12 ; 45)

III.2.6.5. Pompe à fréquence variable

La variation de la vitesse du vent entraîne variation de la fréquence du courant. La courbe de puissance de moteur SCIG (Speed Squirrel Cage Induction Generator) est représentée par l'illustration ci-dessous. Par conséquent la vitesse de rotation de la pompe varie avec le débit refoulé par la pompe.



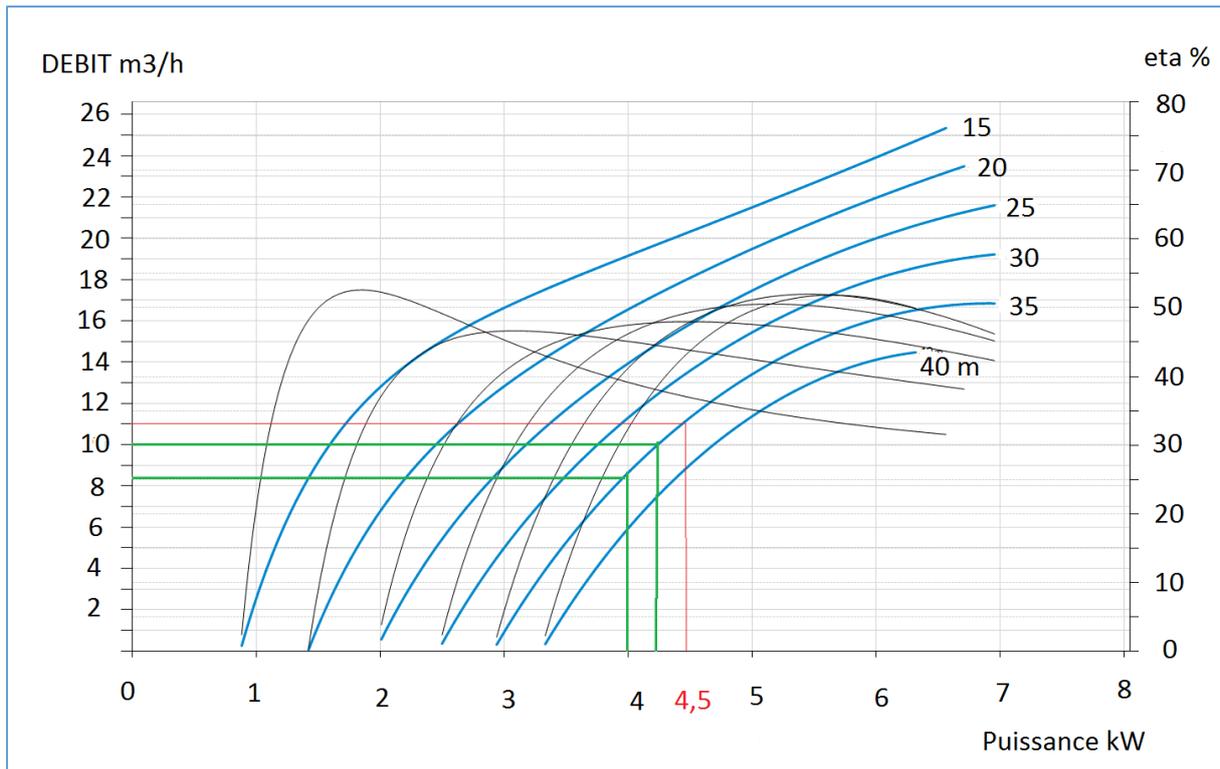
(Source WIND TURBINE: variable speed for induction generator)

Illustration 34 : Relation entre la puissance, vitesse de rotation et vitesse du vent

Cette courbe représente la variation des puissances en fonction de vitesse de rotation et vitesse du vent. D'après cette courbe on choisit trois nouvelles pompes à fréquence variables cité ci-après.

III.2.6.5.1. Pompe solaire de surface du puits

On remplace la pompe de surface du puits par une nouvelle pompe de surface dont les caractéristiques sont données en annexe 16. Cette pompe est la nouvelle pompe qui remplace la pompe de surface du puits.



(Source Solar Submersible Pump System for 6" wells)

Illustration 35 : Plage de fonctionnement de la pompe puits

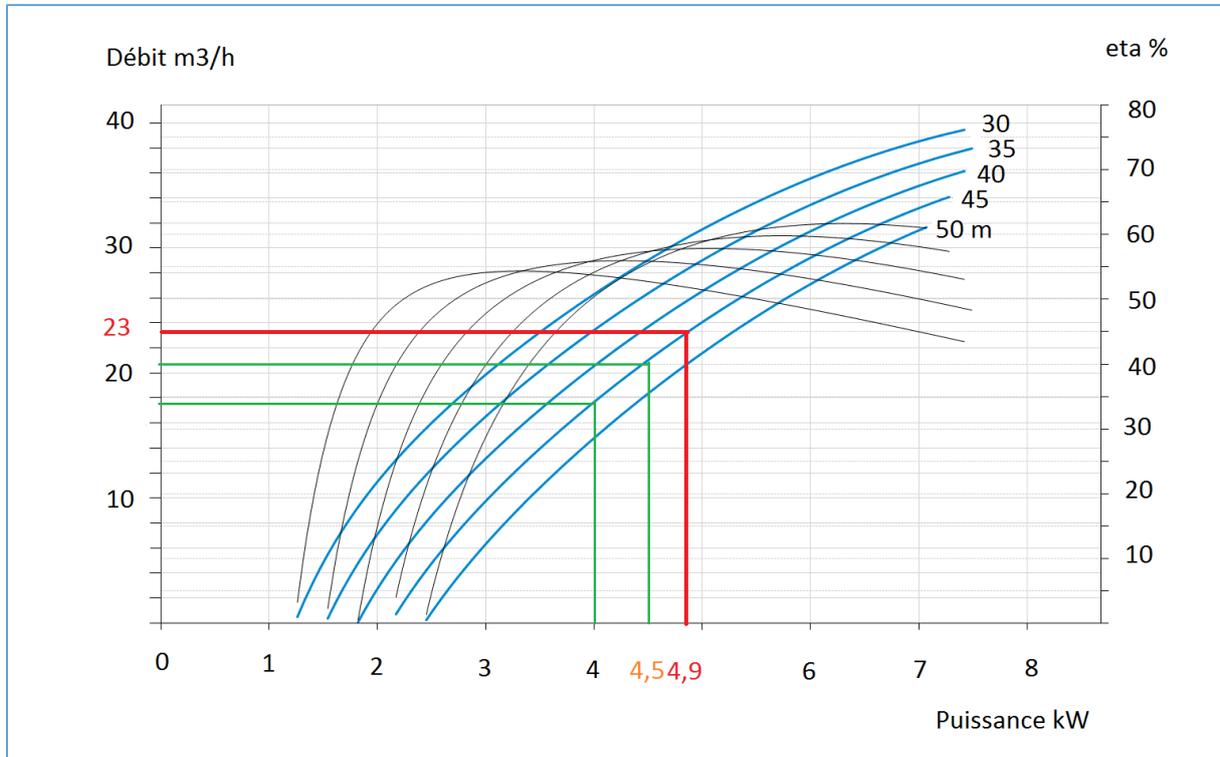
Les courbes bleues indiquent les plages de variations des débits de pompe en fonction de puissance et HMT. Et les courbes noires représentent les rendements de la pompe. Dans notre cas, pour un débit 11 m³/h, de puissance 4,5 kW avec un point de fonctionnement sur la courbe HMT 35 m. Cette pompe peut fonctionner durant les périodes de vents favorables par rapport au fonctionnement actuel.

Interprétation

Les traçages de couleurs vertes sont les exemples. Quand la puissance fournie par l'éolienne passant le convertisseur est de 4 KW, la pompe ne débite que 9 m³/h environ. Et pour une puissance 4,25 KW, la pompe débite 10 m³/h. On peut constater que l'on se rapproche du rendement maximal quand la puissance fournie à la pompe est de 4.5 KW.

III.2.6.5.2. Pompe solaire immergée du forage F1

Comme la pompe du puits on remplace aussi la pompe immergée du forage F1 par une pompe solaire immergée Lorentz qui a des courbes ci-dessous dont les caractéristiques sont dans l'annexe 17.



(Source Solar Submersible Pump System for 6" wells)

Illustration 36 : Plage de fonctionnement de la pompe F1

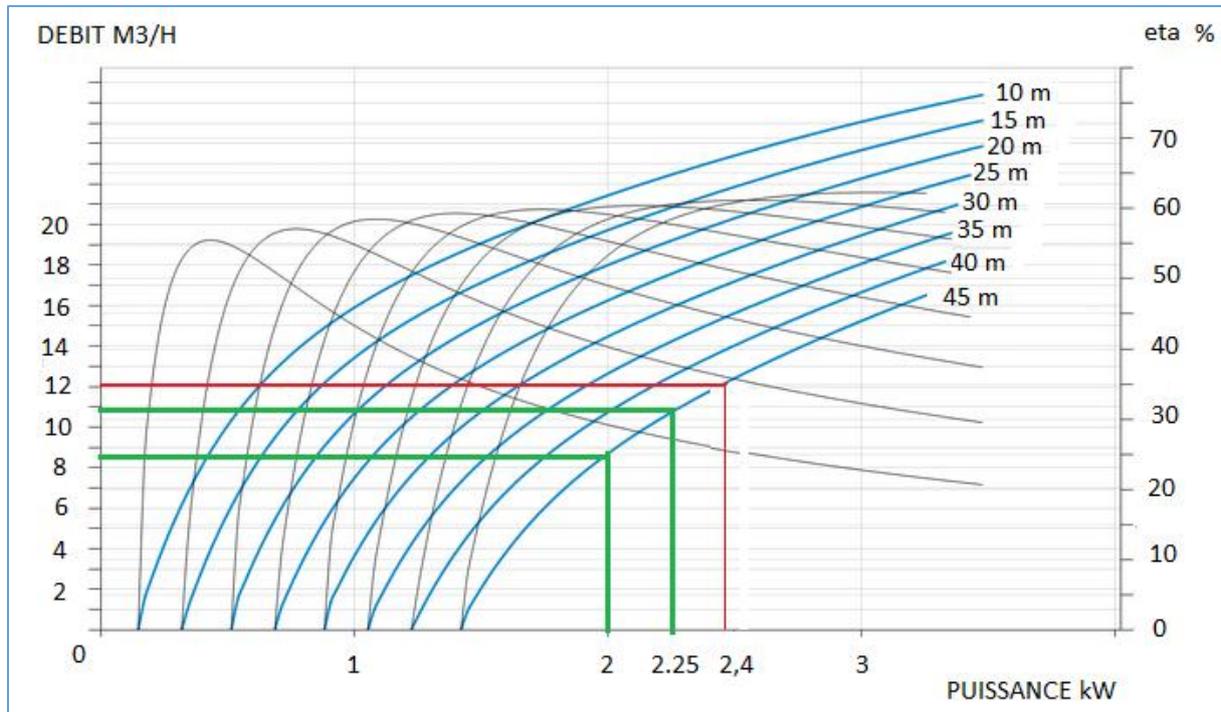
Les courbes bleues indiquent les plages de variations des débits de pompe en fonction de puissance et HMT. Et les courbes noires représentent les rendements de la pompe. Dans notre cas, pour un débit 23 m³/h, de puissance 4,9 kW avec un point de fonctionnement sur la courbe HMT 40 m. Cette pompe peut fonctionner pendant 24h.

Interprétation :

Les traçages de couleurs vertes sont les exemples. Quand la puissance fournie par l'éolienne passant le convertisseur est de 4 KW, la pompe ne débite que 18 m³/h environ. Et pour une puissance 4,5 KW, la pompe débite 20 m³/h. On peut constater que l'on se rapproche du rendement maximal quand la puissance fournie à la pompe est de 4.9 KW.

III.2.6.5.3. Pompe solaire immergée du forage F2

Comme les pompes ci-dessus, on choisit une pompe solaire immergée qui a des courbes ci-dessous dont les caractéristiques sont dans l'annexe 18.



(Source Solar Submersible Pump System for 6" wells PS2-4000 C-SJ17-4)

Illustration 37 : Plage de fonctionnement de la pompe F2

Les courbes bleues indiquent les plages de variations des débits de pompe en fonction de puissance et HMT. Et les courbes noires représentent les rendements de la pompe. Dans notre cas, pour un débit 12 m³/h, de puissance 2,4 kW avec un point de fonctionnement sur la courbe HMT 45 m.

A titre des exemples, si la puissance fournie par l'éolienne passant le convertisseur est de 2 kW, la pompe du F2 débite 9 m³/h. De plus, si l'éolienne fournie une puissance de 2,25 kW, la pompe du F2 débite 11 m³/h. Ces exemples sont indiqués par la couleur vert dans la courbe. On peut constater que l'on se rapproche du rendement maximal quand la puissance fournie à la pompe est de 2.4 KW.

On remplace la pompe du forage F2 par cette pompe solaire immergée qui a des courbes ci-dessus dont les caractéristiques sont dans l'annexe. Le principe de fonctionnement est tel que la puissance électrique générée par l'onduleur est d'abord adaptée à la tension de

l'électropompe. Un câble conducteur permet ensuite l'alimentation de l'électropompe en courant alternatif, pour actionner le refoulement de l'eau. Comme l'eau refoulée sera stockée, nous pouvons proposer l'utilisation d'un interrupteur flotteur afin d'arrêter le pompage quand le réservoir est plein.

Analyse du système :

- Identification de l'organisation structurelle
- Identification des constituants en relation avec les fonctions et les contraintes.
- Le fonctionnement du système existant est à maintenir mais il sera commuté sur l'éolienne dans les conditions favorables de vent (éventuellement solaire).

Les temps de fonctionnement de ces trois pompes en mois Aout sont donnés par le tableau suivant.

Tableau 7 : Temps de fonctionnement en mois d'aout (vent favorable)

| Heure de marche | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
|---------------------------|-------------|-------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| Pompe puits (kW) | 4,50 | 4,50 | 4,50 | 4,50 | 4,50 | 4,50 | 4,50 | 4,50 | 4,50 | 4,50 | 4,50 | 4,50 | | 4,50 | 4,50 | 4,50 | 4,50 | 4,50 | 4,50 | 4,50 | 4,50 | 4,50 | 4,50 | | |
| Pompe Forage 1 (kW) | 4,9 | 4,9 | 4,9 | 4,9 | 4,9 | 4,9 | 4,9 | 4,9 | 4,9 | 4,9 | 4,9 | | 4,90 | 4,90 | 4,90 | 4,90 | 4,90 | 4,90 | 4,90 | 4,90 | 4,90 | 4,90 | 4,90 | 4,90 | |
| Pompe Forage 2 (kW) | | | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 |
| Somme des puissances (kW) | 9,40 | 9,40 | 11,80 | 11,80 | 11,8 | 6,90 | 7,30 | 11,8 | 11,8 | 11,8 | 11,8 | 11,8 | 11,80 | 11,80 | 11,80 | 11,80 | 11,80 | 11,80 | 2,40 |

III.3. Inverseur

L'inverseur a pour rôle de basculer la source de l'alimentation de chaque pompe solaire sur le réseau JIRAMA. Dans notre cas, on utilise 3 inverseurs (ayant des intensités 14A à la sortie de ces inverseurs) automatique pour dévier l'alimentation des pompes en cas de puissance éolienne faible. Donc pour basculer l'alimentation des pompes, on choisit des inverseurs GPA+GPU

Mode de démarrage :

On démarre automatiquement le moteur advenant une basse de pression détectée par le capteur de pression (pression sous le seuil de départ). Le contrôleur doit être en mode automatique.

Mode de d'arrêt :

L'arrêt automatique n'est possible qu'après un démarrage automatique et que si cette fonction est activée, le moteur est automatiquement arrêté 10 minutes après la restauration de la pression (au-dessus du point de consigne d'arrêt), à supposer qu'aucune autre cause de démarrage n'est présente.

III.4. Détermination des accessoires

L'étude préconisera de remplacer tout le système existant, depuis les pompes, aux câblages à l'armoire de commande, en un système complet de pompage éolienne. Il est à noter que dans le respect de la normalisation et de la standardisation des équipements des forages d'exploitation de la JIRAMA, les pompes adaptées au solaire et éolienne seront commandées avec les spécifications techniques particulières :

- Rendement des moteurs 35 à 45 %
- Matériaux en acier inoxydable, roue et diffuseur en acier inoxydable
- Partie hydraulique et moteur séparées

Ce système de pompage éolienne fonctionnera au fil du vent, dont le rendement mensuel varie suivant la période (hiver été etc.). Le rendement du système dépendra donc principalement de l'énergie éolienne disponible.

III.4.1. CABLES

Les calculs sont faits en ligne à partir d'un site « SIGMA TEC-Les câbles et les chutes de tension » (cf. en annexe 19). On utilise des câbles de deux sections différentes

- En courant continu (de l'éolienne vers le convertisseur ou coffret AC)
- En courant alternatif (de convertisseur vers le comptage).

III.4.1.1. Calcul d'un câble DC

Matériau conducteur : cuivre 20 m de longueur

$$\text{Intensité Imp. : } I = \frac{P}{U} \quad (32)$$

Avec $P=22 \text{ kW}$ et $U_{DC}=360 \text{ V}$

Donc $I=61,11 \text{ A}$ et à partir de SIGMA TEC, on obtient que la section du câble est 16 mm^2 .

III.4.1.2. Calcul d'un câble AC

III.4.1.2.1. Pour la puissance 4,5 kW

Matériau conducteur : Aluminium 10 m de longueur 0,14 euro

Puissance : 4,5 kW

Tension d'injection de l'onduleur $U_{AC} = 240 \text{ V Tri +N}$

On obtient alors que la section calculée de l'onduleur est 10 mm^2 avec chute de tensions résultantes de 1,56V.

III.4.1.2.2. Pour la puissance 4,9 kW

Matériau conducteur : Aluminium 10 m de longueur 0,14 euro

Puissance : 4,9 kW

Tension d'injection de l'onduleur $U_{AC} = 240 \text{ V Tri +N}$

On obtient alors que la section calculée de l'onduleur est 10 mm^2 avec chute de tensions résultantes de 1,70V.

III.4.1.2.3. Pour la puissance 2,4 kW

Matériau conducteur : Aluminium 10 m de longueur 0,14 euro

Puissance : 2,4 kW

Tension d'injection de l'onduleur $U_{AC} = 240 \text{ V Tri} + N$

On obtient alors que la section calculée de l'onduleur est 4 mm^2 avec chute de tensions résultantes de 2,08V.

III.4.2. Entretien d'une éolienne

L'éolienne a besoin d'entretien pour bien surveiller ces composantes. Sa durée de vie moyenne est d'une vingtaine d'années. Bien entretenue et correctement nettoyée, elle peut durer davantage. Comme l'intérêt économique d'une éolienne dépend de sa durée de vie, il convient de l'allonger au maximum en appliquant les précautions suivantes :

- L'aérogénérateur est descendu du mât pour être contrôlée et entretenu.
- Graisser le rotor
- Les huiles et les graissages sont remplacés, les serrages contrôlés.
- C'est également l'occasion de vérifier les pales pour les nettoyer.

Au bout de 10 ans, certaines pièces de l'éolienne soumises à l'usure seront sans doute à changer ou réparer : pales, alternateur, démultiplicateur. Cette visite coûte entre 200 et 1000 euros HT, selon la puissance de l'éolienne, et peut conduire à une journée d'interruption de fonctionnement. Schématiquement, la maintenance peut être répartie en 3 catégories :

III.4.2.1. La maintenance préventive :

Cette maintenance se fait 2 fois par an, soit tous les 6 mois, à l'exception des machines qui viennent d'être mises en service et qui feront l'objet d'une première maintenance après 500h de fonctionnement. La maintenance préventive vise, en dehors de l'entretien courant (vidange, graissage, etc.) à vérifier l'état général des composants de l'éolienne et ainsi prévoir un remplacement anticipé si nécessaire avant une casse ou un accident.

L'avantage pour le producteur étant de choisir le moment de la réparation donc des conditions climatiques lors de l'arrêt de l'éolienne. En le réalisant un jour où il y a peu ou pas

de vent l'exploitant limitera la perte de production et les risques portant sur les techniciens (dont le travail est rendu plus périlleux en cas de vent fort).

III.4.2.2. La maintenance curative :

Contrairement à la précédente, ce type de maintenance n'est pas choisi par l'exploitant car il consiste à intervenir dès qu'une panne se déclare. Dans ce cas, il est important pour l'exploitant de limiter au minimum le temps d'arrêt des éoliennes donc la perte de production.

La rapidité d'intervention des équipes de techniciens de maintenance est donc très importante. En fonction des sociétés de maintenance, les techniciens peuvent être soit répartis dans des centres régionaux de maintenance ou dans des bases dédiées (base vie), au plus près du parc.

III.4.2.3. La maintenance conditionnelle :

Ce type de maintenance est appelé à se développer dans les prochaines années et viendra en support des actions de maintenance préventive. Le but est, là encore, d'anticiper les problèmes éventuels avant leur apparition grâce à un système de surveillance CMS (Control Monitoring System). Ce système permet de détecter des usures précoces sur l'ensemble de l'axe de rotation de l'éolienne.

Il s'agit notamment d'étudier les courbes vibratoires des composants lors de leur fonctionnement et de repérer des comportements vibratoires anormaux, signe d'usures importantes ou prématurées. Ceci permettra de mieux cibler voire de réduire le nombre de pièce à changer en limitant les dégâts collatéraux en cas de rupture de cette pièce. Globalement ce type de maintenance augmentera également la sécurité des installations.

Dans tous les cas, les résultats des maintenances font l'objet d'un suivi attentif et d'un archivage systématique rendant disponible sur demande les registres d'entretien des machines, par exemple, pour les agents de contrôle des installations classées. L'exploitant réalise ou fait réaliser un contrôle des actions de maintenance (et en général de sous-traitance) menées sur les installations garantissant ainsi le maintien en bon état des installations.

CHAPITRE - IV. CALCULS TECHNIQUES

DIMENSIONS HYDRAULIQUE

IV.1. Elaboration du modèle VOHEMAR sur Epanet

IV.1.1. Introduction du logiciel Epanet

Nous utilisons le logiciel EPANET à cause des avantages qu'elle offre :

- La taille du réseau étudié est illimitée.
- Le calcul des pertes de charge, il dispose des formules de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach, et Chézy-Manning.
- Il inclut les pertes de charge singulières aux coudes, aux tés, etc.
- Il peut modéliser des pompes à vitesse fixe ou variable.
- Il peut calculer l'énergie consommée par une pompe et son coût.
- Il peut modéliser différents types de vannes, comme des clapets anti-retour, des vannes de contrôle de pression ou débit, des vannes d'arrêt, etc.
- Les réservoirs peuvent avoir des formes variées (le diamètre peut varier avec la hauteur).
- Il peut y avoir différentes catégories de demandes aux nœuds, chacune avec une modulation propre.
- Le fonctionnement de station de pompage peut être piloté par des commandes simples, (heures de marche/arrêt en fonction du niveau d'un réservoir) ou des commandes élaborées plus complexes.

IV.1.2. Elaboration du modèle VOHEMAR sur Epanet

Les objectifs des simulations sur EPANET sont pour faire apparaître la situation actuelle du réseau et la simulation avec éolienne. Après le lancement d'une simulation réussie de notre réseau sur Epanet, plusieurs états du système peuvent être représentés et affichés sous forme de rapport, de schéma, de tableau ou de graphique.

Les résultats calculés aux nœuds à un temps donné de la simulation sont :

- La charge hydraulique
- La pression

Les résultats calculés aux arcs à un temps donné de la simulation sont :

- Le débit
- La vitesse
- La perte de charge unitaire

IV.2. Simulation de fonctionnement

IV.2.1. Simulation de fonctionnement actuel

Les objectifs de la simulation dans ce projet sont de faire apparaître le fonctionnement réel du système. Les trois pompes sont alimentées par le secteur de JIRAMA et elles fonctionnent par le temps de fonctionnement donné par les exploitants à la station de production (tableau 7).

Le schéma général du réseau c'est-à-dire simulation de fonctionnement actuelle du réseau et les caractéristiques de chaque pompe sont présentés par l'illustration 33.

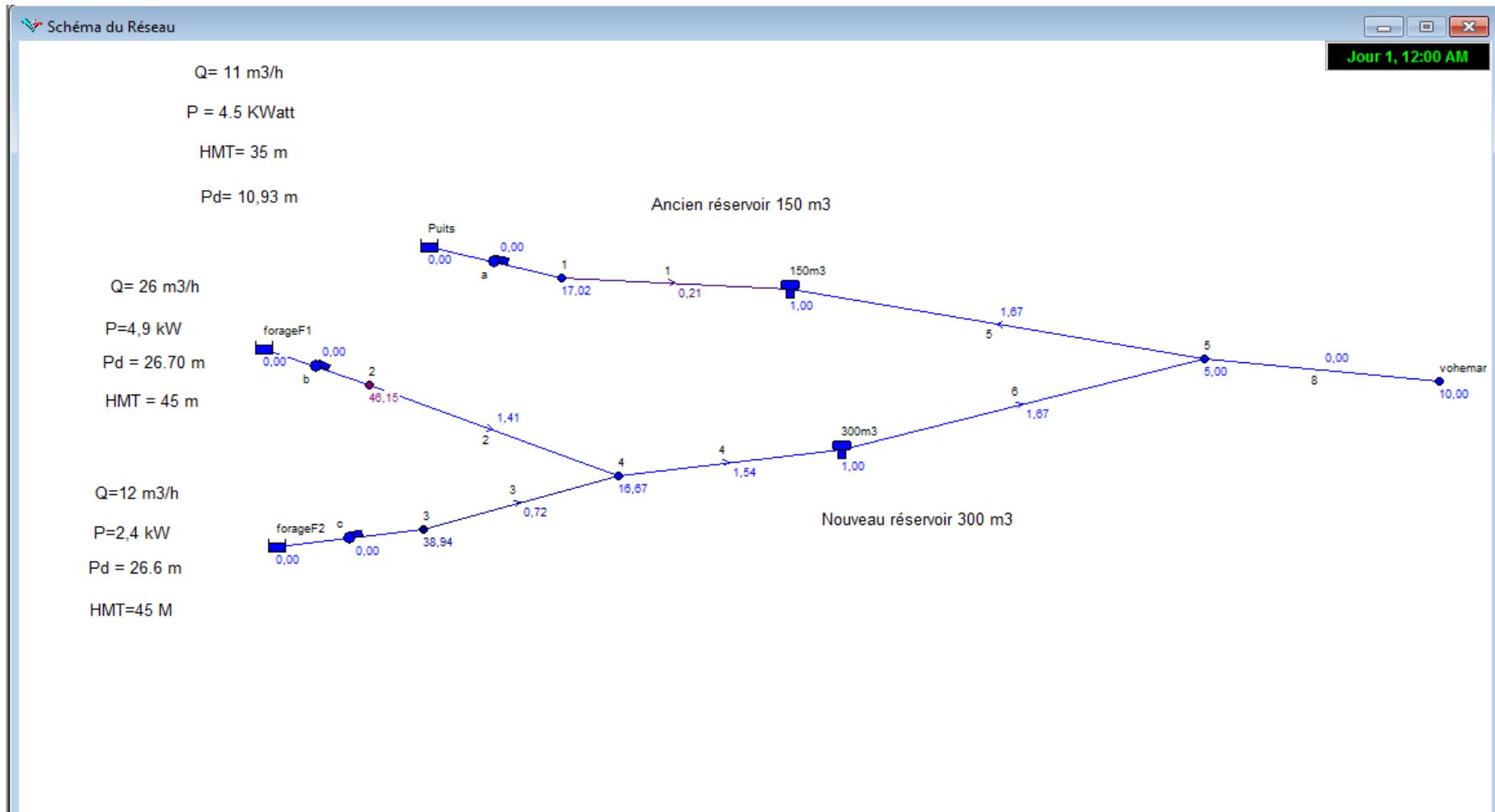


Illustration 38 : Simulation de fonctionnement actuelle du réseau

Les données pour les réseaux sont les suivantes :

- La distance entre F1 et Té = 118m
- La distance entre F2 et Té = 28m
- La distance entre té vers réservoir = 77m
- Hauteur géométrique de refoulement : $H_g = 40m$

IV.2.1.1. Débit avant d'entrée au réseau (arc 8)

Les débits calculés dans les conduites sont les débits affectés aux tronçons. Les débits max sont à 4h et à 7h du matin. Par contre à 16h les débits sont faibles. Ces débits obtenus par l'illustration 33 sont confrontés avec les données récoltés avec les agents de Vohemar.

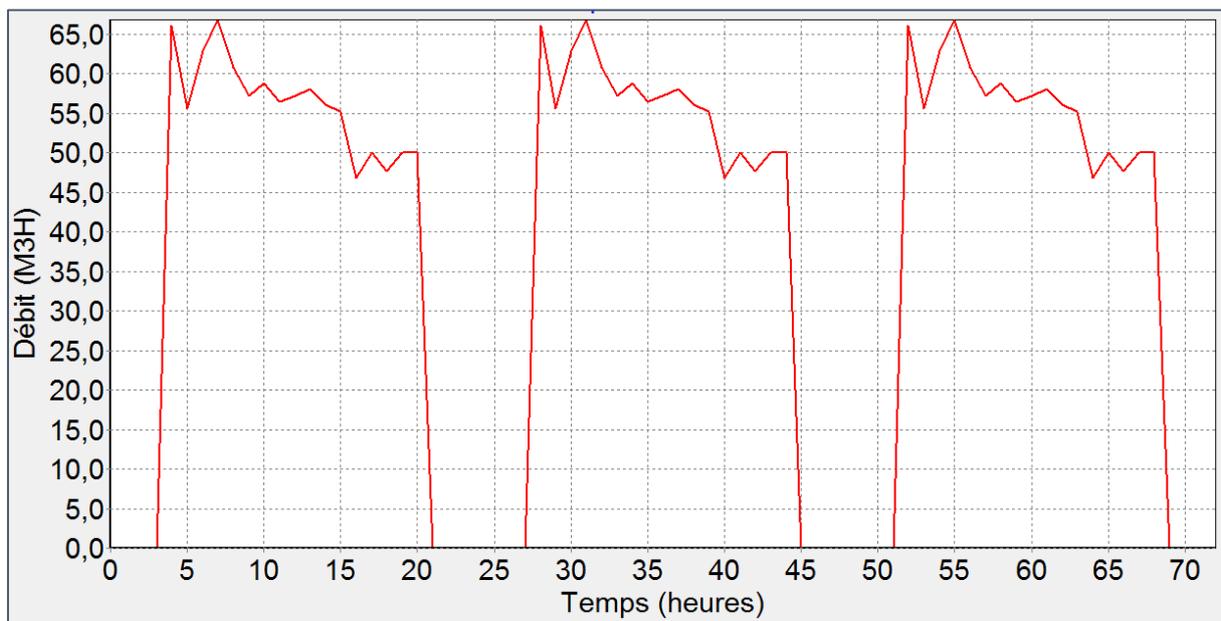


Illustration 39 : Graphe d'évolution de débit (arc 8 avant d'entrée au réseau)

IV.2.1.2. Vitesse (arc 8)

La courbe de distribution de vitesse montre que plus de 60 % des arcs est dans la plage des vitesses acceptables, c'est-à-dire comprise entre 0,8 à 1,2 m/s ; et le reste des conduites ont une vitesse inférieure à 0,4 m/s. Notons que les vitesses faibles favorisent les dépôts sur la

conduite, et les fortes vitesses nous donnent des pertes de charge considérables. Par conséquent, on peut dire que les tuyaux sont bien dimensionnés par rapport aux vitesses.

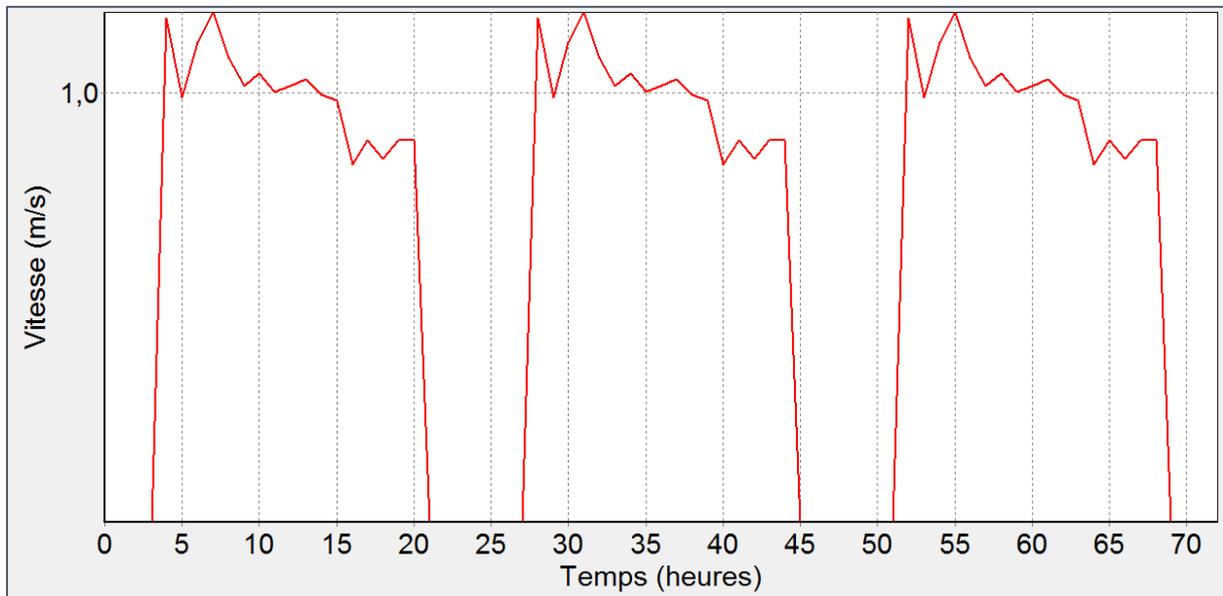


Illustration 40 : Graphe d'évolution de vitesse (arc 8, avant d'entrée au réseau)

IV.2.1.3. Pression

La figure ci-dessous montre la distribution des pressions en avant d'entrée au réseau à 8 heures du matin.



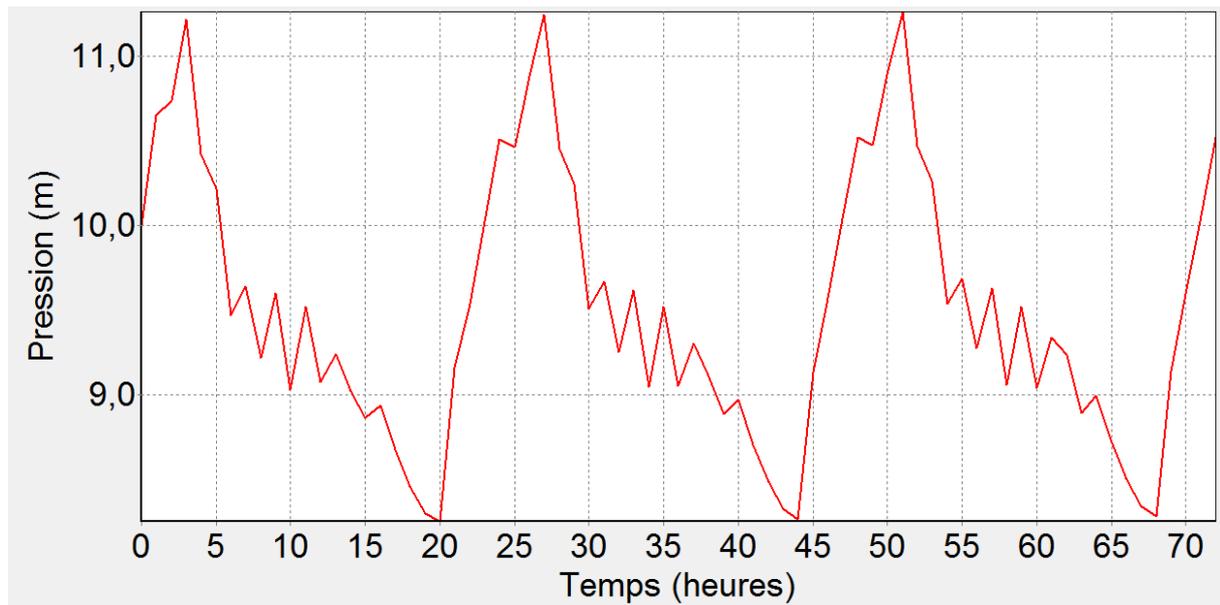


Illustration 41 : Graphe d'évolution de pression en amont, avant d'entrée au réseau

IV.2.1.4. Courbe de modulation

C'est la courbe de variation générale des demandes du réseau ou de la consommation des clients dans la journée. Suivant l'heure de la journée, la demande varie au niveau de chaque point de puisage.

Tableau 8: Pour les branchements particuliers

| | | | | | | |
|--------|------|-----|------|-----|------|------|
| heure | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Coeff. | 0,1 | 0,3 | 0,5 | 0,6 | 0,9 | 1,30 |
| heure | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| Coeff. | 1,57 | 1,1 | 1,02 | 1,5 | 1,8 | 1,9 |
| Heure | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| Coeff. | 1,7 | 1,5 | 1,4 | 1,2 | 1,3 | 1,2 |
| Heure | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| Coeff. | 1,1 | 0,8 | 0,55 | 0,4 | 0,25 | 0,1 |

La courbe de modulation est représentée par l'illustration ci-dessous.

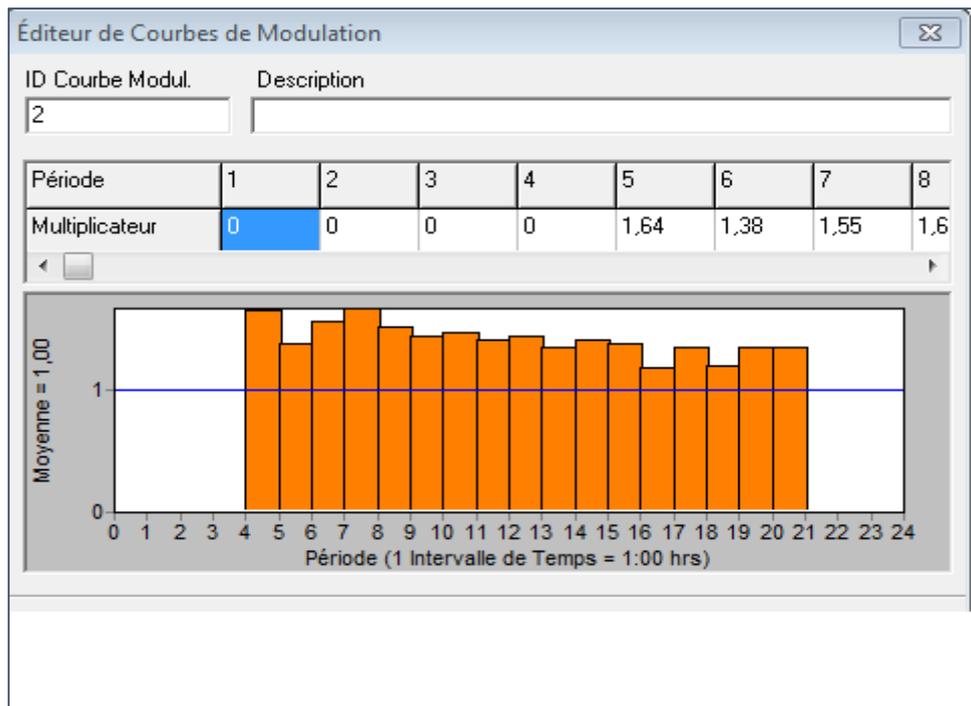


Illustration 42 : Courbe modulation

Cette courbe de modulation est adaptée en fonction du courbe de relevée compteur.

Le coefficient de pointe est obtenu par la formule suivante :

$$\text{coeff de pointe} = \frac{\text{debit total}}{\text{debit moyen}} \quad (33)$$

IV.2.1.4.1. Caractéristiques de chaque nœud

Tableau 9: Caractéristiques de chaque nœud

| ID nœud | Coord X | Coord Y | Altitude | Demande Base (m3/h) |
|---------|----------|---------|----------|---------------------|
| 1 | 3236,71 | 7971,01 | 22 | 0 |
| 2 | 1626,41 | 7053,14 | 3 | 0 |
| 3 | 2077,29 | 5797,10 | 1 | 0 |
| 4 | 3703,70 | 6264,09 | 27 | 0 |
| 5 | 8599,03 | 7278,58 | 35 | 0 |
| 6 | 10595,81 | 7149,76 | 30 | 20 |

IV.2.1.4.2. Caractéristique de chaque tuyau

Tableau 10: Caractéristiques de chaque tuyau

| ID arc | Longueur | Diamètre intérieur |
|---------|----------|--------------------|
| Tuyau 1 | 60 | 123,4 (PVC140) |
| Tuyau 2 | 118 | 79,2 (PVC90) |
| Tuyau 3 | 29 | 79,2 (PVC90) |
| Tuyau 4 | 77 | 79,2 (PVC90) |
| Tuyau 5 | 50 | 141 (PVC150) |
| Tuyau 6 | 50 | 141 (PVC150) |
| Tuyau 7 | 100 | 141 (PVC150) |

IV.2.1.5. Courbe variation réservoir

Le rôle des réservoirs est d'assurer la régulation de la production d'eau et de la sécurité de la distribution. On trouve deux réservoirs dans la station d'ANDRORONA :

- L'un c'est l'ancien réservoir ayant de capacité 150 m³ alimenté par la pompe du puits
- Et l'autre c'est un nouveau réservoir ayant de capacité 300 m³ alimenté par les deux pompes des forages.

Leurs dimensionnement sont :

$$V = S * H \quad (34)$$

Avec $S = \pi * r^2 = \pi * \frac{d^2}{4}$

$$V = \pi * \frac{d^2}{4} * H \quad (35)$$

$$\text{Donc } d = \sqrt{\frac{4V}{\pi * H}} \quad (36)$$

IV.2.1.5.1. Volume d'eau distribuée

Le responsable de la station de JIRAMA à Vohepar ne prend pas la variation du niveau d'eau dans les réservoirs. Mais il compte le volume d'eau distribuée dans un intervalle

d'unité de temps de 4 heure jusqu'à 21h. A partir de 21h à 4 h du matin, la distribution est occupée. Donc l'eau est pompée pour remplir les réservoirs seulement.

On voit en fin de temps (à 4h du matin) un volume de 273 m³ c'est-à-dire 61 % de capacité des réservoirs (150 m³ + 300 m³). Et à 4h du matin, nouvelle distribution, le tableau ci-dessous montre le relevé compteur distribuées dans 4 heure jusqu'à 21h (intervalle d'une heure).

Voici le tableau qui indique les indexes données par exploitants à la station de Vohemar.

Tableau 11 : Les index récoltés par les exploitants

Date du jour 1

| Heures | 06 H 00 | 7 H 00 | 8 H 00 | 9 H 00 | 10 H 00 | 11 H 00 | 12 H 00 | 13 H 00 | 14 H 00 | 15 H 00 | 16 H 00 | 17 H 00 | 18 H 00 |
|--------------|---------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|--------------------|----------|---------|---------|
| Index | 205487 | 205551 | 205623 | 205690 | 205750 | 205811 | 205868 | 205906 | 205962 | pose (stockage) | stockage | 205962 | 206027 |
| | 64 | 72 | 67 | 60 | 61 | 57 | 38 | 56 | 65 | 65 | 65 | 65 | 63 |

| Heures | 19 H 00 | 20 H 00 | 21 H 00 | 22 H 00 | 23 H 00 | 24 H 00 | 01 H 00 | 2 H 00 | 3 H 00 | 4 H 00 |
|--------------|---------|---------|---------|---------|-----------------|----------|----------|----------|----------|--------|
| Index | 206090 | 206150 | 206206 | 206261 | Pose (stockage) | stockage | stockage | stockage | stockage | 206261 |
| | 60 | 56 | 55 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Date du jour 2

| Heures | 06 H 00 | 7 H 00 | 8 H 00 | 9 H 00 | 10 H 00 | 11 H 00 | 12 H 00 | 13 H 00 | 14 H 00 | 15 H 00 | 16 H 00 | 17 H 00 | 18 H 00 |
|--------------|---------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Index | 206311 | 206362 | 206407 | 206456 | 206498 | 206545 | 206586 | 206621 | 206657 | pose | 206657 | 206725 | 206783 |
| | 51 | 45 | 49 | 42 | 47 | 41 | 35 | 36 | 68 | 68 | 68 | 58 | 61 |

| Heures | 19 H 00 | 20 H 00 | 21 H 00 | 22 H 00 | 23 H 00 | 24 H 00 | 01 H 00 | 2 H 00 | 3 H 00 | 4 H 00 |
|--------------|---------|---------|---------|---------|-----------------|----------|----------|----------|----------|--------|
| Index | 206844 | 206899 | 206955 | 207001 | Pose (stockage) | stockage | stockage | stockage | stockage | 207001 |
| | 55 | 56 | 46 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Les valeurs données dans le tableau ci-dessous (tableau 12) sont obtenues par la différence des 2 index successive (tableau 11) pour la production récoltée par les exploitants.

Tableau 12 : Les index relevé par compteur distribuées

| Heurs | Volume d'eau distribuées m³ |
|--------------|---|
| 4 à 5h | 66 |
| 5 à 6h | 52 |
| 6 à 7h | 61 |
| 7 à 8h | 67 |
| 8 à 9h | 59 |
| 9 à 10h | 55 |
| 10 à 11h | 57 |
| 11 à 12h | 54 |
| 12 à 13h | 55 |
| 13 à 14h | 56 |
| 14 à 15h | 53 |
| 15 à 16h | 52 |
| 16 à 17h | 41 |
| 17 à 18h | 45 |
| 18 à 19h | 42 |
| 19 à 20h | 45 |
| 20 à 21h | 45 |

Courbe de variation de volume d'eau mesurée au compteur par unité de temps

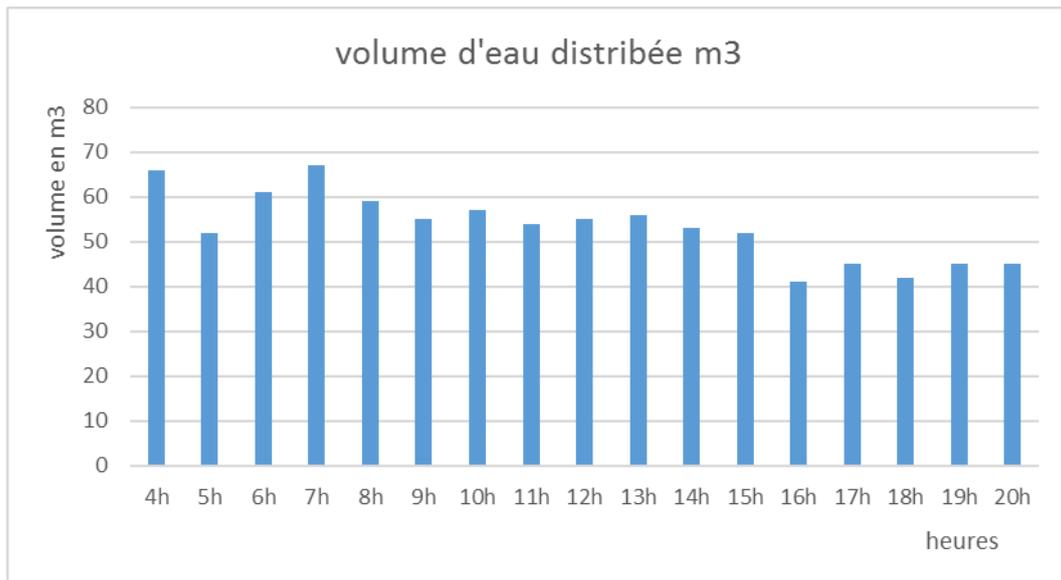


Illustration 43 : Volume d'eau distribuée

IV.2.1.5.2. Courbe de remplissage du réservoir 150 m3

Le diamètre de ce réservoir est obtenu par la formule (36).

$$A.N : d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot 150}{3,14 \cdot 3,5}} \quad \boxed{d=7,5 \text{ m}}$$

Tableau 12 : Caractéristique du réservoir 150 m³ pour la simulation

| Propriété | Valeur |
|---------------------|---------|
| *ID Réservoir | 150m3 |
| Coordonnée X | 5136,88 |
| Coordonnée Y | 7874,40 |
| Description | |
| Genre | |
| *Altitude du Radier | 44 |
| *Niveau Initial | 1 |
| *Niveau Minimal | 0 |
| *Niveau Maximal | 3 |
| *Diamètre | 7,5 |
| Volume Minimal | |
| Courbe de Volume | |
| Modèle de Mélange | Parfait |
| Fraction de Mélange | |

D'après cette illustration, le réservoir 150 m³ est presque plein à 4h du matin, et le niveau d'eau diminue dans ce temps et il se vide à 18 à 19h.

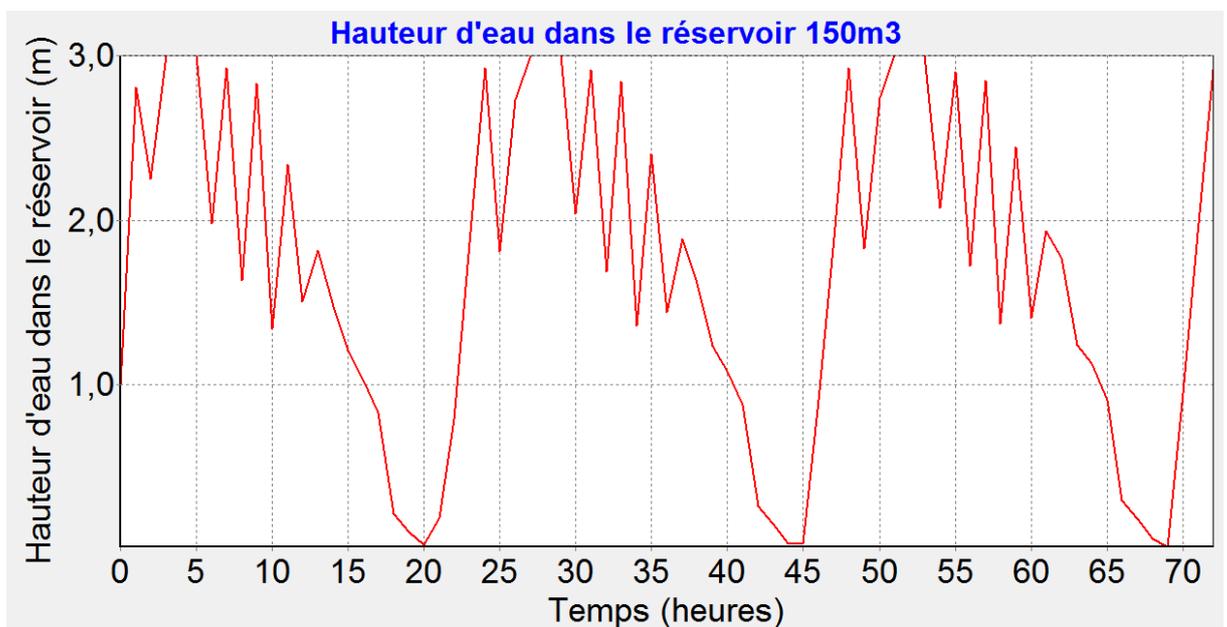


Illustration 44 : Courbe de hauteur d'eau dans le réservoir 150 m³

IV.2.1.5.3. Courbe de remplissage du réservoir 300 m³

Le diamètre de ce réservoir est obtenu par la formule (36). Si on fait l'application numérique, on obtient:

$$A.N : d_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot 300}{3,14 \cdot 3,5}} \quad \boxed{d=10,44 \text{ m}}$$

Le niveau d'eau dans le nouveau réservoir 300 m³ est monté de 0 à 5 h du matin, son niveau diminue à 5h jusqu'à 7h du matin et il remonte jusqu'à 16 h.

Tableau 13 : Caractéristique du réservoir 300m³ pour la simulation

| Propriété | Valeur |
|---------------------|---------|
| *ID Réservoir | 300m3 |
| Coordonnée X | 6441,22 |
| Coordonnée Y | 6473,43 |
| Description | |
| Genre | |
| *Altitude du Radier | 38 |
| *Niveau Initial | 1 |
| *Niveau Minimal | 0 |
| *Niveau Maximal | 3,5 |
| *Diamètre | 10,45 |
| Volume Minimal | |
| Courbe de Volume | |
| Modèle de Mélange | Parfait |
| Fraction de Mélange | |

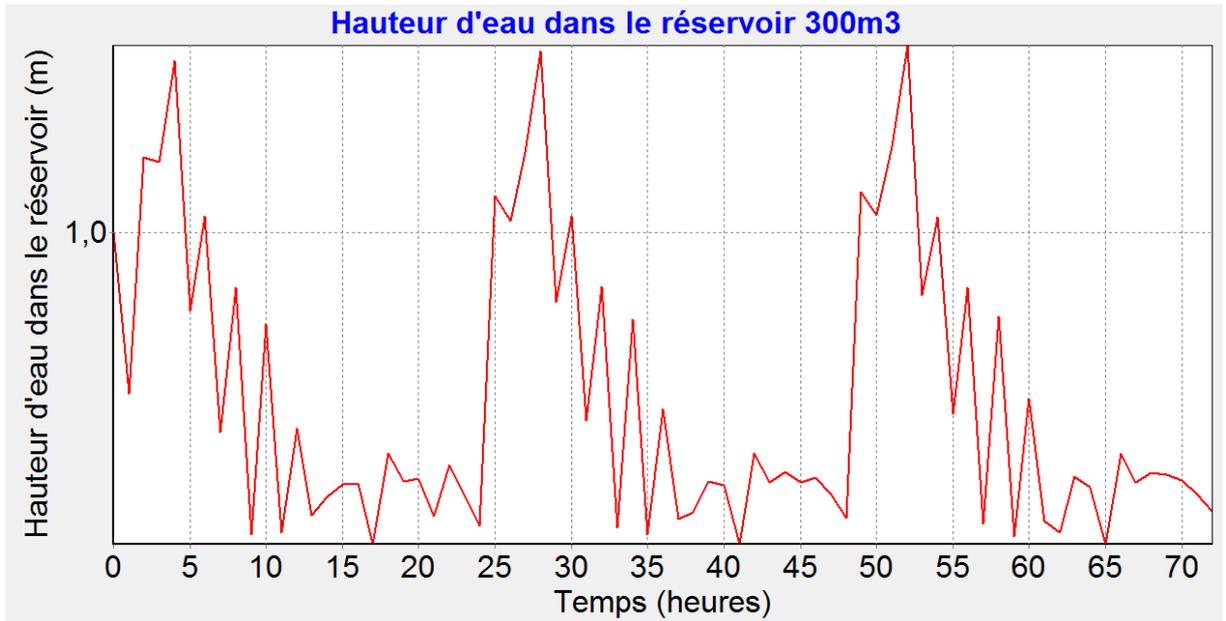


Illustration 45 : Courbe de hauteur d'eau dans réservoir 300 m3

IV.2.1.5.4. Balance en eau pour le système

Dans notre cas les consommations sont presque même que les productions. Cette courbe montre la variation des productions et la consommation par unité de temps. Les courbes en rouges sont les productions et les verts représentent les consommations.

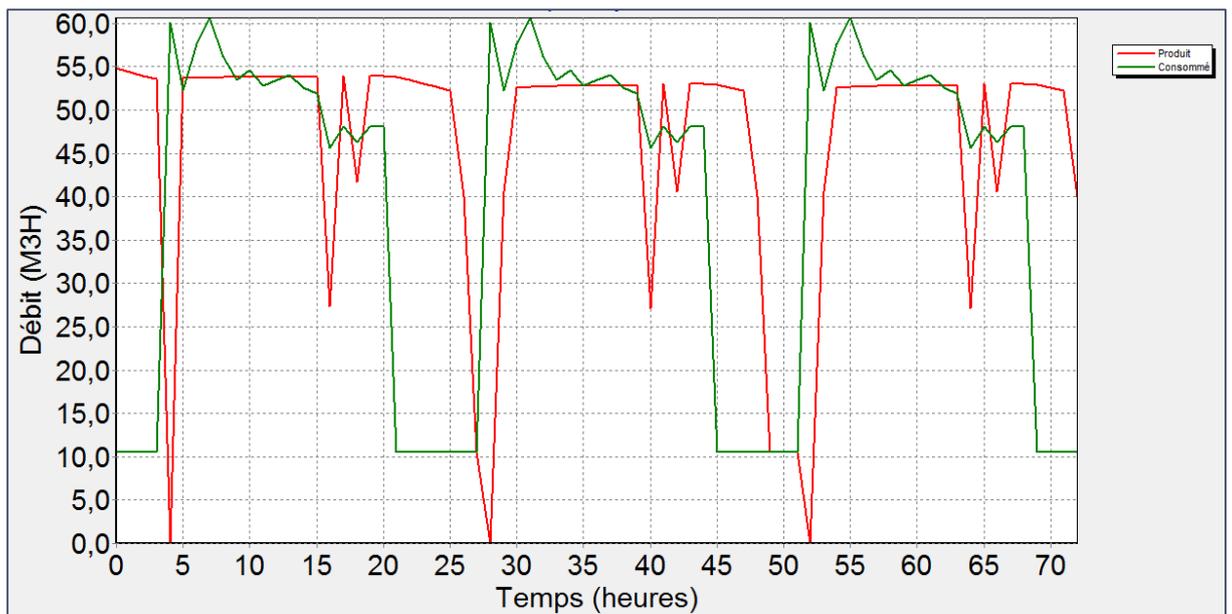


Illustration 46: Balance en eau pour le système

Tableau 14 : Représentation de statistique moyenne journalière, PIC et simulation production éolienne

| | Statistique moyenne journalière m3/jour | PIC (m3/j) | Simulation production éolienne m3/jour |
|--------|---|------------|--|
| jan | 538,10 | 666,67 | 312,10 |
| fév. | 552,38 | 866,67 | 209,90 |
| mars | 619,05 | 1000,00 | 352,86 |
| avril | 580,95 | 966,67 | 464,76 |
| mai | 571,43 | 633,33 | 571,43 |
| juin | 528,57 | 600,00 | 528,57 |
| juill. | 571,43 | 666,67 | 571,43 |
| Aout | 590,48 | 733,33 | 590,48 |
| sept | 533,33 | 666,67 | 533,33 |
| oct. | 528,57 | 633,33 | 528,57 |
| nov. | 519,05 | 633,33 | 415,24 |
| déc. | 533,33 | 666,67 | 224,00 |

IV.2.2. Simulation de fonctionnement avec éolienne en cas de vitesse du vent défavorable (au mois de février)

Au mois de février, l'éolienne ne peut alimenter que la pompe de surface du puits et les pompes immergées des deux forages sont alimentées par le secteur de JIRAMA. Le schéma général du réseau c'est-à-dire simulation de fonctionnement du réseau avec éolienne est trouvé dans l'illustration 43.

L'objectif de cette simulation est de faire la comparaison entre le fonctionnement actuel basé sur les données récoltées auprès des exploitants et le fonctionnement avec éolienne qui est la 2nde simulation. Au mois de novembre à avril, la production fournie par l'éolienne est insuffisante par contre en mois de mai à octobre, elle produit presque la consommation journalière de la station de production.

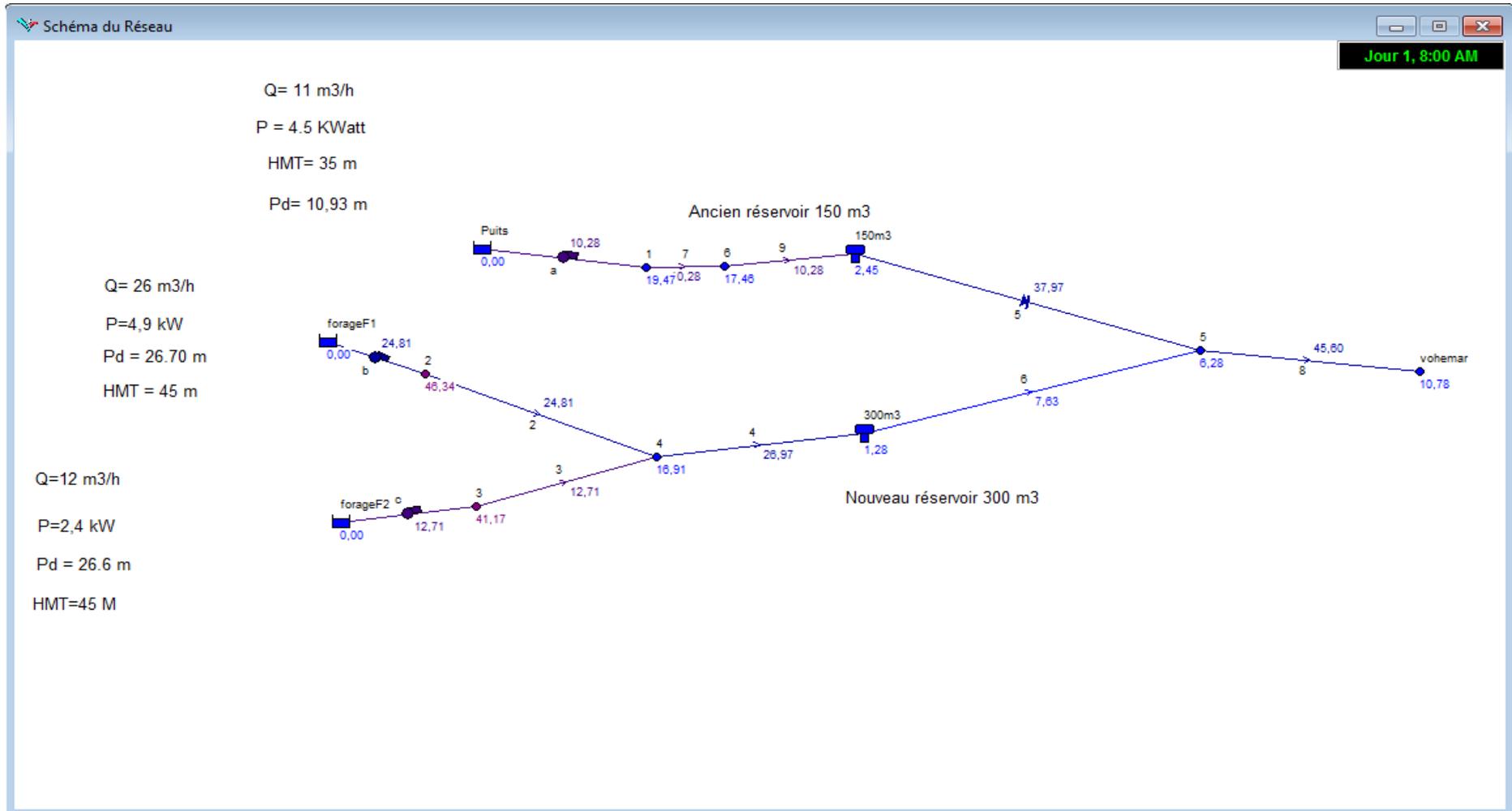


Illustration 47 : Simulation de fonctionnement avec éolienne du réseau

IV.2.2.1. Représentation des débits refoulés par la pompe en février

Tableau 15 : Vitesse de la moyenne du vent en fonction des puissances et débit d'eau refoulée

| Mois | <u><i>Février</i></u> | | | | | | | |
|--|-----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Heurs | 00h | 03h | 06h | 09h | 12h | 15h | 18h | 21h |
| Vitesse moyenne du vent en m/s à 10 m | 3,47 | 3,47 | 3,51 | 3,52 | 3,69 | 3,93 | 3,74 | 3,62 |
| Vitesse moyenne du vent en m/s 19 m | 4,48 | 4,49 | 4,53 | 4,56 | 4,77 | 5,08 | 4,84 | 4,67 |
| Puissance fournie KW | 4,2 | 4,2 | 4,25 | 4,27 | 4,4 | 5 | 4,5 | 4,3 |
| Débit refoulé par la pompe m ³ /h | 10,3 | 10,30 | 10,40 | 10,50 | 10,75 | 13,20 | 11,00 | 10,50 |

Ce tableau présente la variation des débits refoulé par la pompe de surface du puits en mois de février en fonction des puissances et vitesses du vent produit par l'éolienne. Les puissances données par ce tableau sont obtenues par la courbe des puissances en fonction des vitesses du vent de l'éolienne PERFEO 20 KW. Et les débits sont obtenus par la courbe de nouvelle pompe solaire de surface du puits. Le débit refoulé par cette pompe au fil du vent est presque constant à ces heures données par le tableau ci-dessus.

IV.2.2.2. Courbe de remplissage de réservoir

- La courbe de remplissage du réservoir 150 m³ qui est obtenue lors de la 2^{ème} simulation (simulation avec éolienne pour la saison le plus faible vent au mois de février) est la suivante.

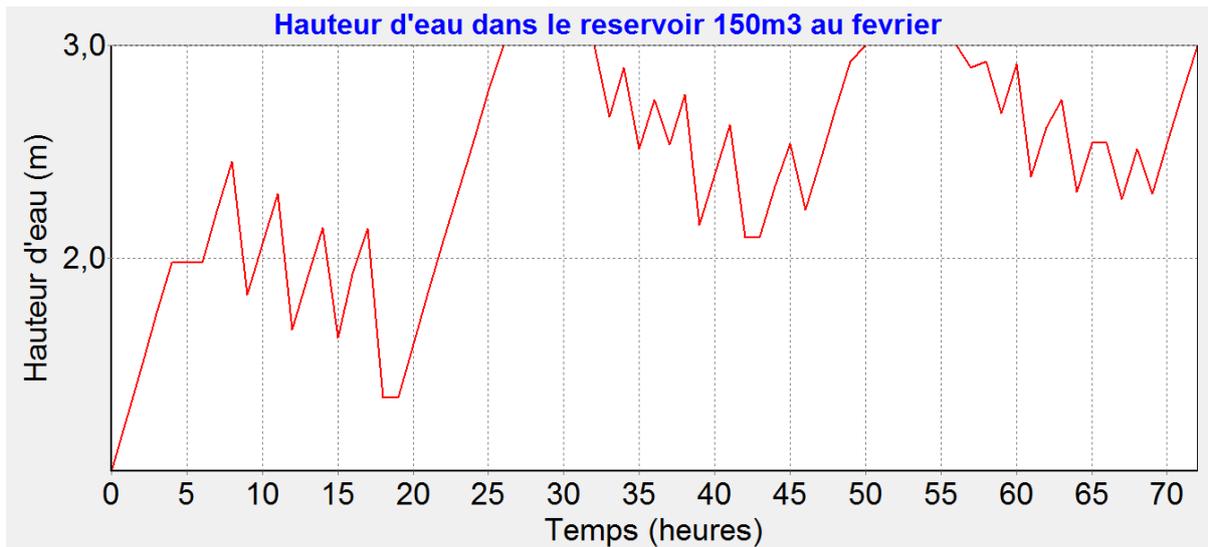


Illustration 48 : Courbe de hauteur d'eau dans réservoir 300 m³ lors de la 2^{ème} simulation

Le battement est périodique à partir de 20 h.

Interprétation : La courbe de remplissage du réservoir de la première simulation (fonctionnement actuel basé sur les données récoltées auprès des exploitants) et la 2^{ème} simulation c'est-à-dire fonctionnement avec éolienne sont presque semblables.

➤ Au mois d'Aout

L'éolienne peut alimenter les trois pompes de la station d'Androrona. Et voici les courbes qui caractérisent les hauteurs d'eau dans les deux réservoirs.

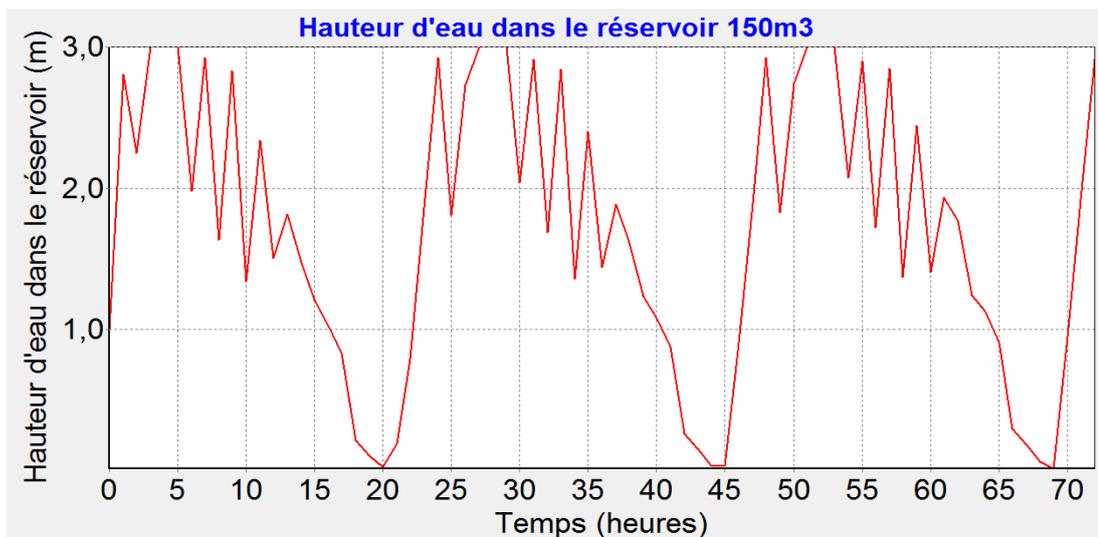


Illustration 49 : Hauteur d'eau dans le réservoir 150 m³ pour des débits constants

La hauteur d'eau dans le réservoir suit un battement périodique de 24 h pour la simulation du fonctionnement actuelle.

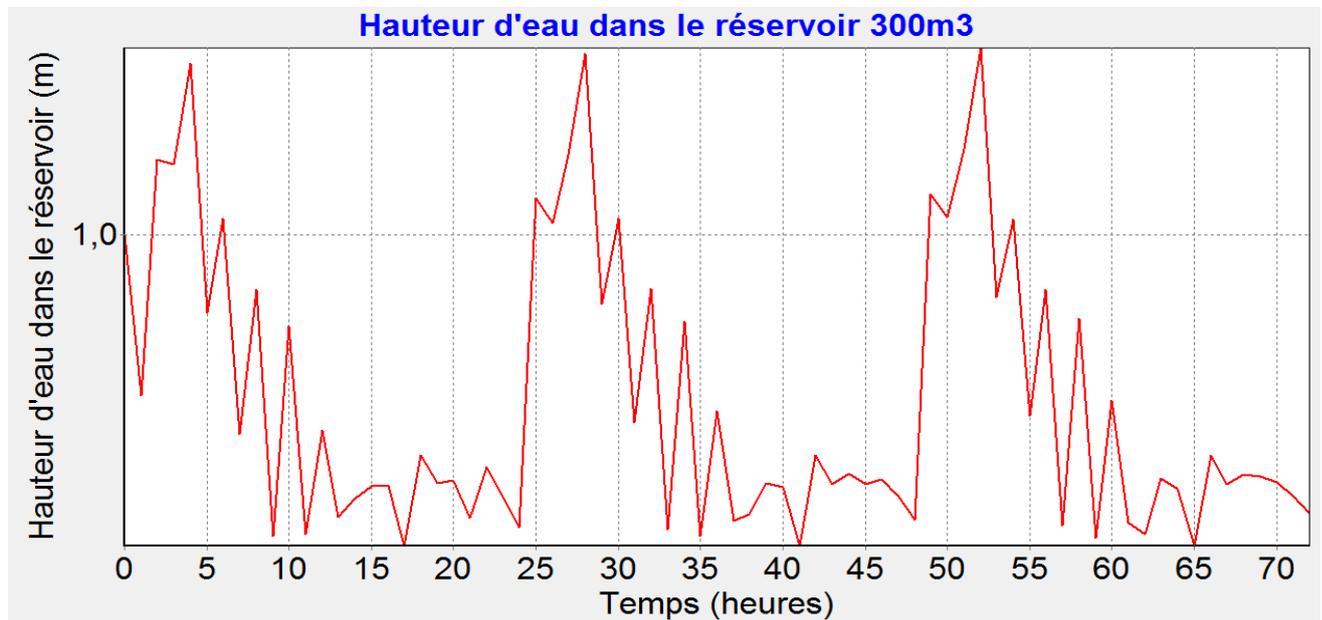


Illustration 50 : Hauteur d'eau dans le réservoir 300 m³ pour des débits constants

IV.3. Comparaison entre la simulation avec éolienne et la simulation sans éolienne

La comparaison se base sur les observations du niveau d'eau dans le réservoir 150 m³ pendant le mois le plus défavorable des vitesses du vent, on constate que la puissance produit par l'éolienne peut bien alimenter la pompe de surface pour le remplissage de ce réservoir. Néanmoins, on observe un léger décalage entre les courbes de remplissage de ce réservoir en temps normale et en temps le plus défavorable.

Pour la simulation avec éolienne, on constate que ce réservoir se vide à 00h et se remplit à 4h tandis que la simulation sans éolienne montre que le niveau d'eau dans le réservoir atteint à 1m de haut à 4h et se vide à 20h.

CHAPITRE - V. **CALCUL DE LA FONDATION**

EOLIENNE

La structure support doit avoir une emprise suffisante au sol pour garantir la sécurité. Elle doit monter le rotor à une hauteur suffisante pour qu'il soit au-dessus de la turbulence locale de sol et lui permettre de résister à la vitesse de vent la plus forte possible.

Pour le calcul de fondation, on détermine les éléments suivants.

- Les efforts agissant sur le mât
- La surface de la semelle

V.1. Efforts agissant sur le mât

Le système est soumis à son poids total \vec{P} , à la force axiale \vec{F} , à la tension du câble \vec{T} et à la réaction du sol \vec{R} . Pour déterminer la force du vent \vec{F} et la réaction \vec{R} , nous avons procédé à la projection suivant les deux axes cartésiens (Ax, Ay) comme l'indique l'illustration ci-dessous.

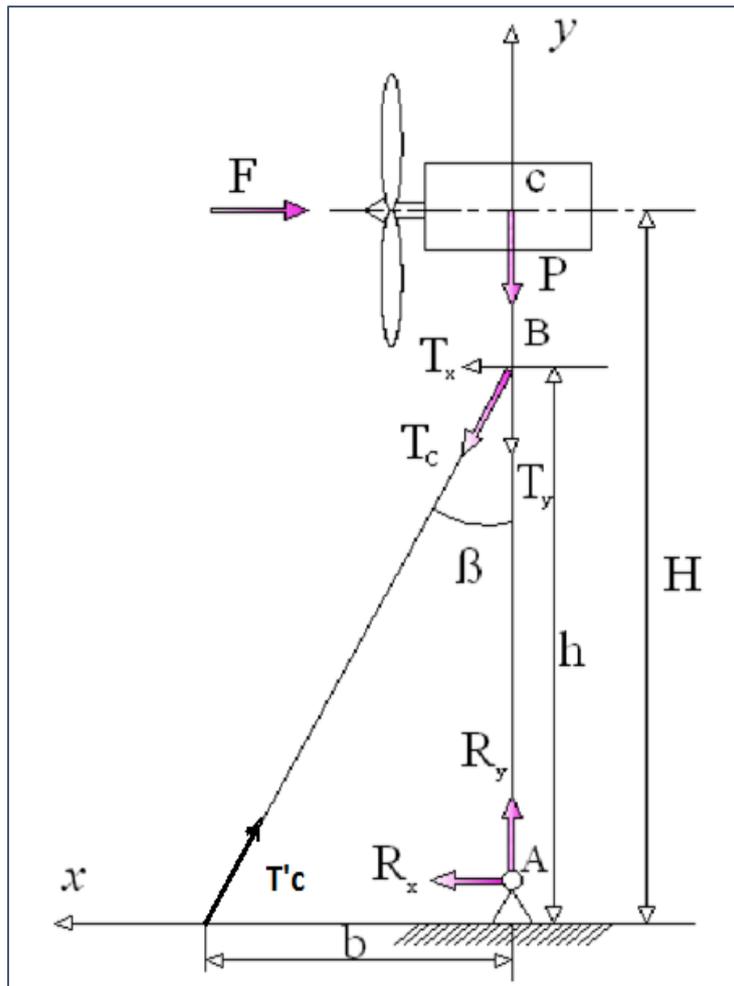


Illustration 51 : Les efforts agissants sur le mât

La force axiale \vec{F} est donnée par la formule suivante

$$F = \frac{4}{9} \times \rho \times S \times V_{max}^2 \quad (37)$$

V.2. La surface de la semelle

La surface de la semelle est déterminée à partir de l'effort ultime apporté par l'ouvrage N_u en N et la capacité portante du sol $\frac{N_u}{q}$ en MN/m^2 .

$$S \geq \frac{N_u}{q} \quad (38)$$

On multiplie par trois l'effort ultime apporté par l'ouvrage pour assurer la stabilité à cause de vibration des matérielles placées au-dessus du mât. L'effort ultime apporté par l'ouvrage N_u .

$$N_u = 1,35 G + 1,5Q \quad (39)$$

G : Poids de la nacelle avec les pales

Q : charge total sur le mât

La capacité portante du sol dépend la nature du sol. On trouvera dans l'annexe 15 un tableau qui contient la capacité portante du sol et la nature du sol. Pour le cas de la station de pompage à Vohemar la capacité portante du sol est de $0,03 \text{ MN/m}^2$.

La nature du sol :

Il doit être suffisamment résistant pour supporter les fondations de l'éolienne. Ce critère n'est pas déterminant car dans le cas d'un sol meuble, des pieux seront alors enfoncés sous les fondations de l'éolienne il existe aussi des éoliennes haubanées.

Les détails des calculs sont dans l'annexe 14.

V.3. Résultats

En faisant l'application numérique, on obtient les inconnues regroupées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 16 : Résultats des calculs

| F(N) | H(m) | h(m) | b(m) | T _x (N) | T _y (N) | T _c (N) | R(N) |
|--------|------|-------|------|--------------------|--------------------|--------------------|-------|
| 210,71 | 19 | 14,04 | 9,67 | 285,25 | 9,61 | 285,42 | 74,63 |

De plus, la surface de la semelle de fondation est de **3,22 m²** et la surface de la semelle de fondation d'ancrage est de **1,29 m²**. Si on déduit les volumes du béton de chaque semelle à partir de chaque surface, on trouve :

- Le volume du béton la semelle de fondation est de **4,84m³**, dosage béton : 350 kg/m³
Coffre (mortier de ciment +sable)

- Le volume du béton la semelle de fondation d'ancrage est de **1,29m³** pour chaque trou, dosage béton : 350 kg/m³

Coffre (mortier de ciment +sable

Tableau 17 : Description des différents éléments constitutif du mât

| Désignation | Caractéristiques | Descriptions |
|----------------------------|---|--|
| FONDATION | <p>Béton fondation : type superficiel à semelle isolée de volume : 4,84m³ Dosage béton : 350 kg/m³ Coffre (mortier de ciment +sable)</p> | Le sol de fondation est pierreux, donc une grande capacité portante vis-à-vis de l'effet de la pression développée par le mât. |
| ANCRAGE DES HAUBANS | <p>Ancrage de béton : la prise de béton est de 28 jours. Dosage béton : 350 kg/m³ Béton pour chaque trou : 1,29 m³. Utilisation d'un ridoir à lanterne pour régler la tension des haubans.</p> | Les points d'ancrage permettent d'assurer un équilibre statique du mât. Ils sont répartis sur un cercle de façon équidistante en faisant un angle de 120°. |
| HAUBAN DU MAT | <p>Câble d'acier de diamètre d_c :</p> $d_c \gg \left(\frac{4 * T_c}{\pi R_e} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (40)$ $d_c = 36,75 \text{ mm}$ | <p>Câbles d'acier de série A Résistance minimale élastique : R_e [daN/mm²] 33 < R_e < 70</p> |
| FLECHE DE LEVAGE | <p>Flèche de levage : Il facilite l'entretien de la machine et du mât. Un seul hauban est utilisé pour les manœuvres de montée et descente du mât.</p> | |

PARTIE III
EVALUATION FINANCIERE DU
PROJET

CHAPITRE - VI. EVALUATION FINANCIERE DU PROJET

Le prix de l'éolienne de pompage dépend de nombreux éléments. Il varie selon le modèle du dispositif, la profondeur du puits ou forage, les caractéristiques du site et aussi les besoins en eau.

VI.1. Devis estimatif

Le coût total de la réalisation du projet est estimé à **QUATRE-VINGT-UN MILLE (80.000 euro) c'est-à-dire TROIS CENT VINGT MILLIONS d'Ariary (320.000.000 Ariary)**. Les composantes du projet sont citées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 18: Devis estimatif

| Désignation | MONTANT HT (Euros) |
|--|--------------------|
| A-La machine (éolienne) et les accessoires | 24 750,00 |
| B- Les matérielles électroniques | 4866,00 |
| C- les pompes | 27 597,00 |
| D-Coûts de génie civil | 5 252 |
| E-Coûts des matériaux du mât tubulaire haubané | 917,91 |
| F-clôture du champ | 650,00 |
| Montant TOTAL | 67 640 |
| TVA 20% | 13 5228 |
| Montant total TTC en Euros | 80 000 |

Les détails de bordereaux devis estimatifs sont dans l'annexe 20.

VI.1. Préambule à l'analyse financière

Ce paragraphe n'est qu'une amorce d'une analyse financière et donne une idée sur la valeur approximative de l'investissement nécessaire par rapport aux chiffres d'affaires recueillis sur les Statistiques Eau année 2007 à 2017. Les autres charges ainsi que les calculs des amortissements des matériels ne sont pas encore considérés.

VI.1.1. Hypothèses de calcul :

- Statistiques Eau de 2007 à 2017.
- Production journalière actuelle : 850 m³/jour
- Moyenne production par énergie éolienne : 442 m³/j
- Moyenne production par GE JIRAMA : 408 m³/j
- Les seules charges fixes d'exploitation considérées dans cette simulation sont :
 - L'achat d'hypochlorite pour la stérilisation de l'eau à 5 530.70 Ar/Kg
 - L'achat de sulfate d'alumine pour la clarification de l'eau à 914.71 Ar/kg
 - Le coût du Gasoil à 3 500 Ar/KWh.
- Valeur du taux d'investissement : 2%
- Durée de vie des infrastructures : 20 à 25 ans
- Taux d'accroissement annuel des ventes : 2%.
- Taux d'actualisation 1,05.
- Tarif moyenne de l'eau : 563 Ar/m³.
- Consommation spécifique en énergie de pompage : 0,47 KWh/m³ (cf. Stat. Eau 2007 à 2016).
- Rendement du réseau : 68% (cf. Stat. Eau VOHEMAR 2007 à 2017).

On suppose qu'il n'y a pas de hausse de prix de l'eau durant la période de simulation

Les valeurs dans ce tableau (Stat. Eau 2010 à 2016) sont des valeurs approximatives. Les détails des calculs financiers sont trouvés au tableau ci-dessous

Tableau 19 : Investissement (subvention) sur la pompe éolienne + GE JIRAMA

| Désignation | Année 0 KAriary | Année1 Kariary | Année2 KAriary | Année3 KAriary | Année4 KAriary | Année 5 KAriary | Année 6 KAriary | Année 7 KAriary | Année 8 KAriary | Année 9 KAriary | Année 10 KAriary | Année 11 KAriary | Année 12 KAriary |
|----------------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Investissement Initial | 320 000 | | - | - | - | - | 1,00 | 2,00 | 3,00 | 4,00 | 5,00 | 6,00 | 7,00 |
| Vente éolienne (m ³) | | 109 704 | 109 704 | 109704 | 109704 | 109 704 | 109 704 | 109 704 | 109 704 | 109 704 | 109 704 | 109 704 | 109 704 |
| Recettes éolien | | 61 763 | 61 763 | 61 763 | 61 763 | 61 763 | 61 763 | 61 763 | 61 763 | 54 852 | 54 852 | 54 852 | 54 852 |
| Prod GE (m ³) | | 101 265 | 105 316 | 109 528 | 113 910 | 118 466 | 123 205 | 128 133 | 133 258 | 138 588 | 144 132 | 149 897 | 155 893 |
| Recette sur GE | | 57 012 | 59 293 | 61 664 | 64 131 | 66 696 | 69 364 | 72 139 | 75 024 | 69 294 | 72 066 | 74 948 | 77 946 |
| Total recette | | 118 776 | 121 056 | 123 428 | 125 894 | 128 460 | 131 128 | 133 902 | 136 788 | 124 146 | 126 918 | 129 801 | 132 799 |
| Charges fixes | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Electricité</i> | | 41 074 | 42 717 | 44 426 | 46 203 | 48 051 | 49 973 | 51 972 | 54 051 | 56 213 | 58 461 | 60 800 | 63 232 |
| <i>Autres charges(Hypo)</i> | | 2 482 | 2 531 | 2 582 | 2 633 | 12 089 | 12 331 | 12 578 | 12 578 | 12 578 | 12 578 | - | - |
| <i>Entretien et transport</i> | | 5 000 | 5 000 | 5 000 | 5 000 | 5 000 | 5 000 | 5 000 | 5 000 | 5 000 | 5 000 | 5 000 | 5 000 |
| Cash-Flow non actualisé | -320 000 | 70 219 | 70 807 | 71 420 | 72 057 | 63 319 | 63 823 | 64 352 | 65 159 | 50 355 | 50 878 | 64 001 | 64 567 |
| Cash-Flow Actualisé | | 66 875 | 53 540 | 46 959 | 41 199 | 31 480 | 27 592 | 27 821 | 28 170 | 21 770 | 21 996 | 27 669 | 27 914 |
| Cash-Flow Cumulé Annuel | | 66 875 | 120 416 | 167 376 | 208 575 | 240 056 | 267 649 | 295 470 | 323 640 | 345 410 | 367 407 | 395 076 | 422 990 |
| CALCUL de la VAN | | - 258 939 | - 205 398 | - 158 438 | - 117 239 | - 85 758 | 270 993 | 245 861 | 227 684 | 208 892 | 190 669 | 191 250 | 191 872 |

Tableau 20: Simulation sans énergie éolienne

| Désignation | Année 0 (Kariary) | Année 1 (Kariary) | Année 2 (Kariary) | Année 3 (Kariary) | Année 4 (Kariary) | Année 5 (Kariary) | Année 6 (Kariary) | Année 7 (Kariary) | Année 8 (Kariary) | Année 9 (Kariary) | Année 10 (Kariary) |
|------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| Investissement Initial | | | - | - | - | - | 1,00 | 2,00 | 3,00 | 4,00 | 5,00 |
| Prod éolien (m³) | | - | - | - | - | - | - | - | | | |
| Recettes éolien | | - | - | - | - | - | - | - | | | |
| Prod GE (m³) | | 210970,00 | 219408,80 | 228185,15 | 237312,56 | 246805,06 | 256677,26 | 266944,35 | 277622,13 | 288727,01 | 300276,09 |
| Recette sur GE | | 118776,11 | 123527,15 | 128468,24 | 133606,97 | 138951,25 | 144509,30 | 150289,67 | 156301,26 | 162553,31 | 169055,44 |
| Total recette | | 118776,11 | 123527,15 | 128468,24 | 133606,97 | 138951,25 | 144509,30 | 150289,67 | 156301,26 | 162553,31 | 169055,44 |
| Charges fixes | | | | | | | | | | | |
| <i>Electricité</i> | | 85571,54 | 88994,40 | 92554,18 | 96256,35 | 100106,60 | 104110,86 | 108275,30 | 112606,31 | 117110,56 | 121794,99 |
| <i>Hypochlorite</i> | | 2482,00 | 2531,64 | 2582,27 | 2633,92 | 12089,68 | 12331,48 | 12578,11 | 12578,11 | 12578,11 | 12578,11 |
| Cash-Flow non actualisé | - | 30722,57 | 32001,11 | 33331,79 | 34716,71 | 26754,96 | 28066,96 | 29436,26 | 31116,84 | 32864,64 | 34682,35 |
| Cash-Flow Actualisé | | 29259,59 | 24197,44 | 21916,19 | 19849,39 | 13301,95 | 12134,12 | 11066,18 | 10172,15 | 9342,18 | 8572,95 |
| Cash-Flow Cumulé Annuel | | 29259,59 | 53457,03 | 75373,22 | 95222,61 | 108524,55 | 120658,67 | 131724,85 | 141897,00 | 151239,18 | 159812,13 |

VI.1.2. Remarque sur le flux trésorerie

On constate qu'investir sur une machine éolienne et trois pompes solaires à la station d'ANDRORONA, fonctionnant en hybride avec le secteur JIRAMA ne pourrait être que rentable. Les charges de consommations en électricité seront environ réduites de moitié.

Le VAN serait positif au bout d'environ 6 ans d'exploitation c'est à dire l'investissement serait revenu au bout de l'année 6. La valeur ajoutée est 40% lors de l'utilisation du système hybride alors qu'elle est évaluée à 22% si on utilise seulement l'énergie fossile.

CONCLUSION

Face à la situation énergétique actuelle, Madagascar doit penser à exploiter les sources d'énergie renouvelables à savoir le vent et l'ensoleillement....

Il est temps désormais d'exploiter les ressources d'eau souterraine pour alimenter en eau potable des zones isolées. Plusieurs techniques peuvent être utilisées pour pomper l'eau, comme l'utilisation du moteur diesel ou essence, les pompes solaires et aussi l'éolienne de pompage. Parmi ces différentes techniques, l'utilisation de l'énergie verte est la meilleure solution.

Autant l'utilisation des systèmes de pompage solaire est encouragée dans les zones ensoleillées, autant l'éolienne de pompage semble le plus recommandée dans les sites isolés et assez bien ventés.

Il est vrai que le coût de l'installation de ces énergies vertes s'avère onéreux, mais en revanche, par rapport aux énergies non renouvelables, la maintenance de celles-ci est plus facile à faire. Cette étude ouvre donc perspectives prometteuses dans le sens de l'utilisation de l'énergie éolienne. Le choix de l'adduction d'eau par éolienne de pompage s'avère être très efficace grâce aux différents avantages qu'il offre du point de vue énergétique.

Nous avons effectué une étude théorique d'une éolienne de pompage et le dimensionnement de tous les éléments constitutifs d'une éolienne de pompage à partir des paramètres caractéristiques d'un site donné et enfin l'étude économique et financières du projet. Toujours dans le cadre de la réalisation pratique, le choix des matériaux utilisés à l'installation d'une éolienne de pompage s'avère très important, afin que chaque élément de l'éolienne puisse supporter l'effort qui lui est appliqué.

Enfin, chaque intellectuel doit apporter son savoir-faire pour la résolution des problèmes d'énergie dans notre pays. A ce sujet, nous estimons pour notre part que la création d'une autre éolienne peut alimenter l'électrification rurale à VOHEMAR

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographique

- [1] E. Muljadi, K. Pierce, and P. Migliore, a Conservative Control Strategy for Variable-Speed Stall-Regulated Wind Turbines, February 2000.
- [2] GOURIERES, D. 1980. ENERGIE EOLIENNE : Théorie, conception et calcul pratique des installations, Edition Eyrolles 61, 267 pages.
- [3] JOURDAIN, P. février 2013. PREVISIONNEL ECONOMIQUE D'UN PROJET EOLIEN. Site à Watts Développement. 12 pages.
- [4] MARTIN, J. TECHNIQUE DE L'INGENIEUR : Energie éolienne. 20 pages.
- [5] PADOVA univerty (Italie), university of GLASGOW (Ecosse) Wind turbine: Variable speed for induction generateur
- [6] PFE RIZZO. Energie éolienne, February 2000
- [7] ROSSMAN.L.A, EPANET 2, Manuel de l'utilisateur, 222p.
- [8] VONINIRINA, A. Janvier 2014. ETUDE SUR L'ENERGIE A MADAGASCAR: RAPPORT DU CREAM, 21 pages.

Support de cours

- [9] MASEZAMANA.H.N, Cours sur le logiciel Epanet, ESPA, 2016.
- [10] MASEZAMANA.H.N, Cours sur le logiciel Global Mapper et Arc GIS, ESPA, 2015.
- [11] RANDRIANASOLO DAVID, 2016, adduction d'eau potable, ESPA, 2016.
- [12] RAFALIMANANA Mampitony Cours sur transfert de chaleur et de masse, ESPA, 2016.

Webographie

- [13] <http://www.auvergne.pref.gouv.fr>
- [14] http://colleges.ac-rouen.fr/prfenelon/article.php3?id_article=306 (valide à la date du 18/06/2009)
- [15] <http://www.flexpro-industry.com>
- [16] http://www.sigma-tec.fr/textes/texte_cables.htm
- [17] [Texsud.e-monsite.com](http://www.texsud.e-monsite.com) (choix du site)
- [18] <http://www.windpower.fr/org/coriolis.htm>
- [19] <http://www.wind-turbine-models>
- [20] <http://fr.m.wikipedia.org>
- [21] <http://fr.m.lorentz.org>
- [22] <http://www.windpower.org/composite-8.htm> (valide à la date du 18/06/2009)

ANNEXE

Annexe 1 : Base de donnée météo, Vitesse du vent en m/s à 10 m de haut à vohemar

| | jan | fév. | Mars | Avril | mai | juin | juillet | aout | sept | oct. | nov. | déc. | V _{moy} |
|----------------------------|-------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------|
| V _{moyene} en m/s | 4,17 | 3,89 | 4,44 | 5 | 6,39 | 7,22 | 7,78 | 8,06 | 7,5 | 6,94 | 5 | 4,17 | 5,88 |
| direction | N/NW | NW/ W | NE/N W | |
| V _{max} | 61,11 | 18,89 | 28,89 | 23,89 | 26,11 | 28,89 | 28,06 | 28,06 | 26,94 | 26,94 | 18,89 | 33,06 | 29,14 |

(Source météo Ampandrianomby)

Annexe 2 : Base de données Wind Finder, Vitesse du vent en m/s à 10 m de haut à vohemar

| | vitesse du vent en m/s à 10 m de haut | | | | | | | | Vitesse moyenne à 10 m de haut m/s |
|--------|---------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|---|
| | 00h | 03h | 06h | 09h | 12h | 15h | 18h | 21h | |
| jan | 4,89 | 4,77 | 4,52 | 4,61 | 5,30 | 5,47 | 5,28 | 5,37 | 5,03 |
| fév. | 3,05 | 3,05 | 2,99 | 3,08 | 3,60 | 4,20 | 3,36 | 2,99 | 3,29 |
| mars | 4,54 | 4,36 | 4,22 | 4,65 | 4,98 | 5,25 | 4,95 | 4,52 | 4,68 |
| avril | 5,18 | 5,22 | 5,10 | 5,93 | 6,01 | 6,01 | 5,18 | 5,14 | 5,47 |
| mai | 5,42 | 5,54 | 5,65 | 6,37 | 6,37 | 6,33 | 5,73 | 5,34 | 5,84 |
| juin | 5,96 | 5,90 | 5,93 | 6,71 | 6,83 | 7,14 | 6,29 | 6,23 | 6,37 |
| juill. | 6,61 | 6,46 | 6,17 | 7,56 | 7,93 | 7,78 | 7,12 | 7,12 | 7,10 |
| Aout | 8,06 | 8,06 | 8,06 | 8,06 | 8,06 | 8,06 | 8,06 | 8,06 | 8,06 |
| sept | 7,50 | 7,50 | 7,50 | 7,50 | 7,50 | 7,50 | 7,50 | 7,50 | 7,50 |
| oct. | 5,65 | 5,48 | 5,60 | 6,23 | 6,62 | 6,85 | 6,40 | 6,44 | 6,16 |
| nov. | 4,80 | 4,28 | 4,45 | 5,14 | 6,34 | 6,34 | 4,97 | 4,45 | 5,10 |
| déc. | 3,78 | 3,99 | 4,14 | 4,57 | 5,02 | 5,23 | 4,20 | 3,60 | 4,32 |

Annexe 3: Production actuel de la station de Vohemar

| | <u>2010</u> | <u>2011</u> | <u>2012</u> | <u>2013</u> | <u>2014</u> | <u>2015</u> | <u>2016</u> | moyenne | m ³ /jour | m ³ /an | <u>KWh requis</u> | <u>KWh Eo</u> | <u>KWh GE</u> | PIC | PIC (m ³ /j) | M3 refoulé par éolienne |
|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------|----------------------|--------------------|-------------------|---------------|---------------|-----|-------------------------|-------------------------|
| Jan | 20 | 14 | 13 | 16 | 17 | 15 | 18 | 16 | 538,10 | 16142,86 | 269,05 | 156,05 | 113,00 | 20 | 666,67 | 312,1 |
| Fév. | 20 | 12 | 12 | 16 | 26 | 14 | 16 | 17 | 552,38 | 16571,43 | 276,19 | 104,95 | 171,24 | 26 | 866,67 | 209,9 |
| mars | 21 | 15 | 16 | 17 | 30 | 18 | 13 | 19 | 619,05 | 18571,43 | 309,52 | 179,52 | 130,00 | 30 | 1000,00 | 352,9 |
| avril | 18 | 16 | 16 | 16 | 29 | 14 | 13 | 17 | 580,95 | 17428,57 | 290,48 | 232,38 | 58,10 | 29 | 966,67 | 464,8 |
| Mai | 19 | 15 | 16 | 18 | 17 | 18 | 17 | 17 | 571,43 | 17142,86 | 285,71 | 228,57 | 308,00 | 19 | 633,33 | 571,4 |
| juin | 17 | 14 | 16 | 18 | 13 | 18 | 15 | 16 | 528,57 | 15857,14 | 264,29 | 211,43 | 352,00 | 18 | 600,00 | 528,6 |
| juill. | 17 | 13 | 17 | 18 | 20 | 19 | 16 | 17 | 571,43 | 17142,86 | 285,71 | 228,57 | 374,00 | 20 | 666,67 | 571,4 |
| Aout | 22 | 14 | 16 | 18 | 19 | 19 | 16 | 18 | 590,48 | 17714,29 | 295,24 | 236,19 | 391,60 | 22 | 733,33 | 590,5 |
| sept | 20 | 12 | 16 | 16 | 12 | 18 | 18 | 16 | 533,33 | 16000,00 | 266,67 | 213,33 | 369,60 | 20 | 666,67 | 533,3 |
| oct. | 19 | 9 | 16 | 16 | 14 | 19 | 18 | 16 | 528,57 | 15857,14 | 264,29 | 211,43 | 341,00 | 19 | 633,33 | 528,6 |
| nov. | 19 | 11 | 16 | 16 | 15 | 16 | 16 | 16 | 519,05 | 15571,43 | 259,52 | 207,62 | 220,00 | 19 | 633,33 | 415,2 |
| déc. | 16 | 13 | 16 | 16 | 15 | 20 | 16 | 16 | 533,33 | 16000,00 | 266,67 | 213,33 | 149,60 | 20 | 666,67 | 224,0 |

Annexe 4 : Caractéristiques techniques de l'onduleur pour la pompe du puits

| caractéristiques | |
|--------------------------------------|---|
| Puissance | 5630VA (4500W) |
| Puissance crête (max.) | 10000VA |
| Tension d'entrée | 48V |
| Tension de sortie | 230V +/- 5%, 50Hz |
| Dimensions (Long. x Larg. x Haut.) | 540 x 295 x 140 mm |
| Poids | 13,5 Kg |
| Température de fonctionnement | 0°C à +55°C (refroidissement par ventilateur) |
| Garantie | 1 an |
| batterie | |
| Entrée CA | 90-280V AC |
| Tension de charge d'absorption (VCC) | - |
| Tension de charge float (VCC) | 54V |
| Tension de coupure max. | 60V |
| Courant charge max. | 60A |

Annexe 5 : Caractéristiques techniques de l'onduleur pour la pompe du forage F1

| Entrée | |
|-------------------------------|--------------------------------------|
| Capacité nominale | 6,13kva / 4,9kW |
| Tension nominale | 380/400VAC or 220/230VAC |
| Plage de tension | 208-478VAC (3/1) or 120-276VAC (1/1) |
| Fréquence | 40-70Hz |
| Facteur de puissance d'entrée | >0,99 |
| Courant THDi | <5% |
| Sortie | |

| | |
|--------------------------------|--|
| Tension | 220/230VAC +- 2% |
| Fréquence | 50/60Hz |
| Distortion | <2% (chargement linéaire) / <5% (chargement non linéaire) |
| Facteur de crête | 3:1 |
| Rendement | ECO-mode >98% / Normale-mode > 90% |
| Batterie | |
| Type | VRLA |
| Tension | Options : 192/216/240V (16-20 batteries) |
| Courant de charge max. | 6A par modules |
| Temps de backup supplémentaire | Batterie interne pour backup à court terme et armoire pour le long terme |
| Protection | |
| Entrée / Sortie | Surcharge, surchauffe, court-circuit, batterie faible, bruit et suppression des surtensions |
| Surcharge mode AC | ?110% - 60min / ?125% - 10min / ?150% - 1min |
| Surcharge mode batterie | ?110% - 30sec / ?125% - 1sec / ?150% - 200msec |
| Surcharge mode Bypass | Disjoncteur d'entrée 60A |
| Alarmes - Indications | |
| Alarme sonore | Bip sonore pour : batterie faible, Bypass, état de surcharge |
| Alarme LED | Sauvegarde, mode Eco, Bypass, batterie faible, déconnexion, surcharge |
| Ecran LCD | Ecran tactile de 5' |
| Bypass | |
| Type | Statique interne (automatique) / dérivation externe en option |
| Plage de tension Bypass | Tension max.: +15% (en option +5/10/25%) / Tension min. -45% (en option -20/30%) plage de protection: ±10% |
| Certificats | |
| Certificats | CE, EN62040-1-1 (ESD), EN62040-2 (EMI) |
| Protection | IP20 |
| Environnement | |
| Température | Température de fonctionnement: 0 - 40°C / Température de stockage : -25 - 55°C |
| Humidité / Altitude | 0-95% / < 1500m |
| Bruit à 1m | <50dB /1m conformément àEN62040-2 |
| Interface | |
| Module | RS232 |
| Option | SNMP-Adaptateur |
| Taille | |
| Dimensions | 443x580x131mm (3u) |
| Poids | 23kg (sans batterie 13,5kg) |

Annexe 6 : Caractéristiques techniques de l'onduleur pour la pompe du forage F2

| | |
|--|--|
| puissance | 3000VA/2400W |
| ENTREE | |
| Tension DC | 24 VDC |
| Tension à froid | 23 VDC |
| Tension acceptable | 21 VDC-29 VDC |
| Protection tension basse | @ consommateur <20% :22,0 VDC |
| | @ 20% ≤consommateur <50% :21,4 VDC |
| | @ consommateur ≥50% :20,2 VDC |
| tension basse de réenclenchement | @ consommateur <20% :23,0 VDC |
| | @ 20% ≤ consommateur <50% :22,4 VDC |
| | @ consommateur ≥50% :21,2 VDC |
| tension basse de coupure | @ consommateur <20% :21,0 VDC |
| | @ 20% ≤consommateur <50% :20,4 VDC |
| | @ consommateur ≥50% :19,2 VDC |
| Rendement | >90% |
| Consommation en énergie sans consommateurs | <20 W |
| Consommation en mode économie | <10 W |
| SORTIE | |
| Régulation de la tension AC (Batt.Mode) | 230 VDC ± 5% |
| Puissance de pointe (5 sec) | 6000 VA |
| Sortie | Pur Sinus |
| PHYSIQUE | |
| Dimension, P×I×H (mm) | 82×232×369 mm |
| Poids (kg) | 4,3 kg |
| ENVIRONNEMENT | |
| Humidité | 5 % à 95 % humidité relative (sans condensation) |
| Température de fonctionnement | 0°C-55°C |
| Température de stockage | 15°C-60°C |

Annexe 7: Caractéristiques de la pompe de puits

| pompe | | | | | | | moteur | | | | | |
|---------|-----------|-----------------|--------------------|----------------|-------------------|-----------------|---------|---------------|------|------------------|----------------|-------------------|
| marque | type | numéro de série | Vitesse (tr/mn) | Tension (V) | Vitesse (m/s). | Mise en service | marque | Poids (kg) | Cos& | Intensité (A) | Tension (V) | Vitesse (m/s). |
| SALMSON | NUS40/160 | TR1438428-1 | 2890 | 220/220/240 | 0,08 | 06/01/2011 | SALMSON | 39,5 | 0,88 | 10,4 | 400 | |

Annexe 8: caractéristique de la source d'ANDRORONA

| SITES | INFRASTRUCTURE | ASSET | CLASSIFICATION | MARQUE | FCT° | FONCT° | CAPACITE/ PUISSANCE/ DIAMETRE |
|-----------|-------------------|--|----------------|---------------|--------|--------|-------------------------------------|
| ANDRORONA | PUITS | P1 | GEPS | SALMSON | M P | EB1 | 4,5KW |
| | | P2 | | | | | |
| | FORAGE | F1 | GEPI | LOWARA | M P | F1 | 4,9KW |
| | | F2 | GEPI | LOWARA | M P | F2 | 2,4KW |
| ANDRORONA | SOURCE GRAVITAIRE | S1 | GEPS | Jeumont s | P | ET1 | 4kw |
| ANDRORONA | STOCKAGE | RESERVOIR1 | SEMI ENTERRE | circulaire | | | 150 m ³ |
| | | RESERVOIR2 | SEMI ENTERRE | rectangulaire | | | 300 m ³ |
| | | CONDUITE DE REFOULEMENT | FONTE | | | | 150 |
| | | BACHE DE REPRISE A 2 COMP | SEMI ENTERRE | | | | 90 m ³ |
| | TRAITEMENT | FILTRE A CORAIL à 2COMPA | RAPIDE OUVERT | | | | 19 m ³ /h |
| | CODUITE | CONDUITE DE DISTR F150 (RES à CTR DE DISTR 500M) | FONTE | | | | 150 |

Annexe 9: Caractéristiques de fonctionnement de forage F1 (Z62205-405T)

| Caractéristique de fonctionnement | | | | | |
|--|--|--|---|---------------------------|-------------|
| Type de pompe | Pompe seule | | Fluide | Eau, claire | |
| Nombre de pompe/secours | 1/ | | T° de fonctionnement t °C | 4 | |
| Débit nominal m ³ /h | 25 | | Valeur de pH a T° t | 7 | |
| HMT nominale m | 45 | | Denté à T° t kg/dm ³ | 1 | |
| Hauteur statique m | 40 | | Viscosité cinématique à temps. T mm ² /s | 1,569 | |
| Inlet pressure bar | 0 | | Tension de vapeur a T° t bar | 1 | |
| Température ambiante °C | 20 | | Particules | 0 | |
| NPSN disponible m | 0 | | Altitude m | 1000 | |
| Caractéristique pompe | | | | | |
| Désignation | Z622 05-40S T | | Impeller φ | Max mm | 107 |
| construction | Submersible pump, multistage pump with diffusers | | | Construction mm | 107 |
| fabriquant | Lowara | | | Min mm | 107 |
| Vitesse 1/min | 2900 | | Débit | Nominal m ³ /h | 26,7 (26,7) |
| Nombre d'étages | 5 | | | Max m ³ /h | 30 |
| Aspiration | / / | | | Min m ³ /h | |
| Refoulement | Rp 2 1/ 2'' /DIN 2999 | | | nominal | 45,7 |

| | | | | |
|----------------------------------|------------------|-----------------------------|----------------------|---------------|
| PN max. du corps de pompe bar | | Hauteur de refoulement | A Q _{max} m | 35,7 |
| Pression de service max. bar | 7,1 | | A Q _{min} m | 72,4 |
| Roue | | Puissance absorbée kW | | 4,9 (4,9) |
| Construction de roue | | Puissance max. à l'arbre kW | | 5 |
| HMT max. (Q=0) m | 72 | Rendement % | | 67,1 |
| Poids kg | 36 | NPSH 3% m | | 4,7 |
| Matériaux | | | | |
| Pompe | | | | |
| Bolts and screws | Acier inox | Support clapet | | Acier inox |
| Gouttière protection câbles | Acier inox | Wear rings | | technopolymer |
| Couling | Acier inox | | | |
| Diffuser | Acier inox | | | |
| Tête de pompe | Acier inox | | | |
| Elastomères | EPDM | | | |
| Roue | Acier inox | | | |
| Lower support | Acier inox | | | |
| Arbre | Acier inox | | | |
| Shaft sleeve and bushing | Tungsten carbide | | | |
| SPACER | Acier inox | | | |

| | | | | | |
|--------------------------------|---|----------------------|-------|----------------------------------|----|
| Crépine | Acier inox | | | | |
| Thrust bearing | PTFE+Graphite | | | | |
| Tie Rod | Acier inox | | | | |
| Clapet | Acier inox | | | | |
| Caractéristiques moteur | | | | câble | |
| Constructeur | Lowara | Tension électrique | 220v | Type de câble | |
| Exécution | 4''/3 submersible oil filled motor (50hz) | | | Section de câble mm ² | |
| Type | 40S55T235 | Courant électrique | 22,9A | Environnemental T°C | 20 |
| Puissance nominale | | Indice de protection | IP68 | Câble length | 0 |
| Vitesse | 2795 1/min | Classe d'isolation | F | | |
| Taille | 4 | | | | |
| Poids | 20,8 Kg | | | | |
| Chassis | | | | Remarque : | |
| Désignation | | | | | |
| poids | kg | | | | |

Annexe 10: Caractéristique pompe de forage F2 Z612 05-40S T

| Caractéristiques requises | | Caractéristiques proposées | | Construction de roue | |
|--|-------------------|----------------------------|----------------------------------|----------------------|-------|
| Débit | 25 | Débit | 26,7 | Impeller φ | 107mm |
| m ³ /h | | m ³ /h | | Fréquence | 50Hz |
| Hauteur de refoulement | 45m | Hauteur de refoulement | 45,7m | Vitesse | 2900 |
| Hauteur statique | 40m | | | t/min | |
| Caractéristique de fonctionnement | | | | | |
| Type de pompe | Pompe seule | | fluide | Eau | |
| Nombre de pompe/secours | 1/ | | T° de fonctionnement t | K | 277 |
| Débit nominal | m ³ /h | 12 | Valeur de pH a T° t | | 7 |
| HMT nominale | m | 45 | Denté à T° t | kg/dm ³ | 1000 |
| Hauteur statique | m | 38 | Viscosité cinématique à temps. T | mm ² /s | 1,569 |
| Inlet pressure | kPa | 0 | Tension de vapeur a T° t | kPa | 100 |
| Température ambiante | K | 293 | Particules | | 0 |
| NPSN disponible | m | 0 | Altitude | m | 1000 |
| Caractéristique pompe | | | | | |
| Désignation | Z612 05-40S T | | | Max | mm |
| | | | | | 106 |

| | | | | | | |
|-----------------------------|-----------------------|-------|--------------------------|--------------------|-------------------|-------|
| Construction | 6 Pouces | | Impeller | Construction | mm | 106 |
| fabriquant | Lowara | | | Min | mm | 106 |
| Vitesse | 1/min | 2900 | Débit | Nominal | m ³ /h | 12,4 |
| Nombre d'étages | 5 | | | Max | m ³ /h | 16,5 |
| Aspiration | / / | | | Min | m ³ /h | |
| Refoulement | Rp 2 1/ 2'' /DIN 2999 | | Hauteur de refoulement | nominal | | 45,5 |
| PN max. du corps de pompe | kPa | | | A Q _{max} | m | 23,5 |
| Pression de service max. | kPa | 577,4 | | A Q _{min} | m | 58,9 |
| Roue | | | Puissance absorbée | | kW | 2,4 |
| Construction de roue | | | Puissance max. à l'arbre | | kW | 2,4 |
| HMT max. (Q=0) | m | 59 | Rendement | | % | 64,75 |
| Poids | kg | 27 | NPSH 3% | | | 2,9 |
| | | | m | | | |
| Matériaux | | | | | | |
| Pompe | | | | | | |
| Bolts and screws | Acier inox | | Support clapet | Acier inox | | |
| Gouttière protection câbles | Acier inox | | Wear rings | technopolymer | | |
| Coupling | Acier inox | | | | | |
| Diffuser | Acier inox | | | | | |

| | | | | | |
|--------------------------------|--------------------------------|----------------------|------|-------------------|-----------------|
| Tête de pompe | Acier inox | | | | |
| Elastomères | EPDM | | | | |
| Roue | Acier inox | | | | |
| Lower support | Acier inox | | | | |
| Arbre | Acier inox | | | | |
| Shaft sleeve and bushing | Tungsten carbide | | | | |
| SPACER | Acier inox | | | | |
| Crépine | Acier inox | | | | |
| Thrust bearing | PTFE+Graphite | | | | |
| Tie Rod | Acier inox | | | | |
| Clapet | Acier inox | | | | |
| Caractéristiques moteur | | | | Câble | |
| Constructeur | Lowara | Tension électrique | 380v | Type de câble | |
| Exécution | 4''/3 submersible motor (50hz) | | | Section de câble | mm ² |
| Type | 40S55T 235 | Courant électrique | 7A | Environnemental T | °C 293 |
| Puissance nominale | | Indice de protection | IP68 | Câble length | 0 |
| Vitesse | 2810 1/min | Classe d'isolation | F | | |
| Taille | 4 | | | | |

| | | | | | |
|----------------------------------|----------------------|-----------------------------------|------------------------|----------------------|------------|
| Poids | 13,4 Kg | | | | |
| Chassis | | | Remarque | | |
| Désignation | | | | | |
| poids | kg | | | | |
| Company | | Company | | Date | 2015-06-21 |
| Contact | | Contact | | Référence | |
| Phone number | | Phone number | | Projet | |
| Email | | Email | | N° de projet | |
| Caractéristiques requises | | Caractéristiques proposées | | Construction de roue | |
| Débit | 12 m ³ /h | Débit | 12,4 m ³ /h | Impeller | 106mm |
| Hauteur de refoulement | 45m | Hauteur de refoulement | 45,5m | Fréquence | 50 Hz |
| Hauteur statique | 38m | | | Vitesse | 2900 1/min |

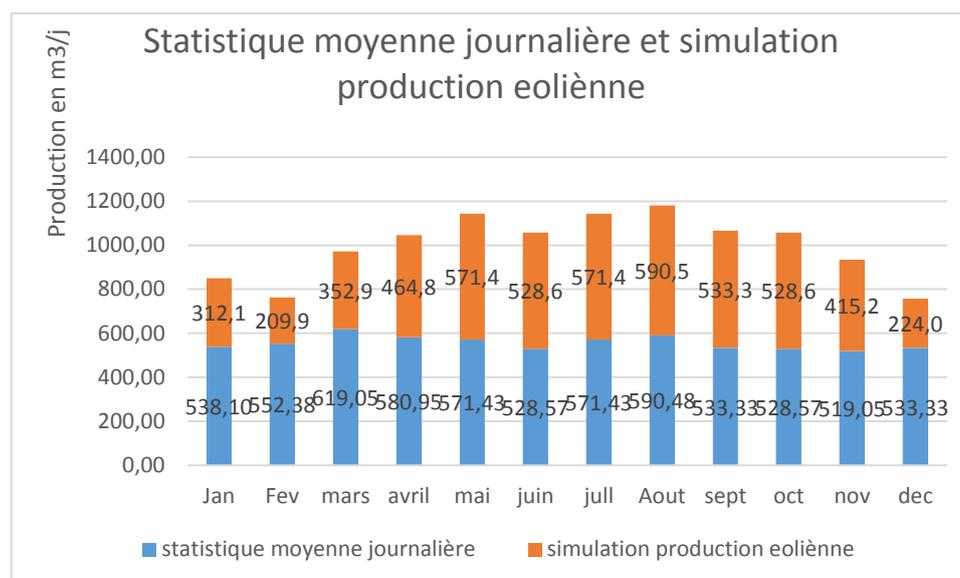
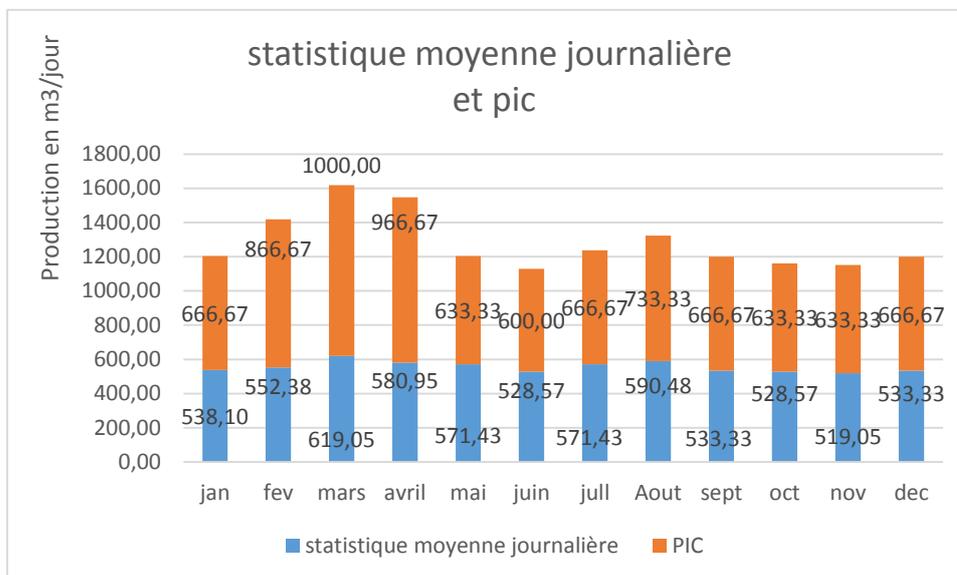
Annexe 11: Temps de marche et Arrêt de chaque pompe

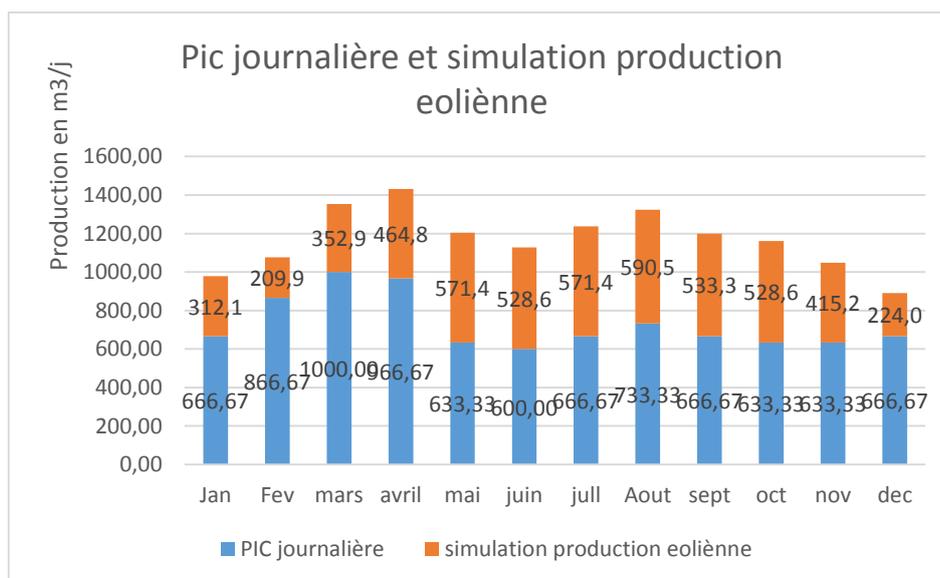
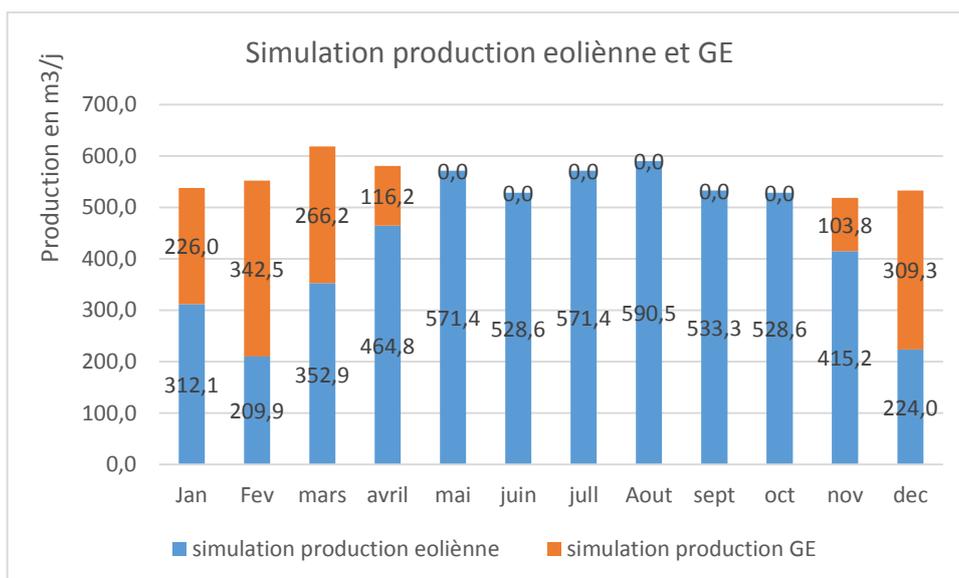
| Heure de marche | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| Pompe puits (kW) | 4,50 | 4,50 | 4,50 | 4,50 | 4,50 | 4,50 | 4,50 | 4,50 | 4,50 | 4,50 | 4,50 | 4,50 | | 4,50 | 4,5 | 4,50 | 4,50 | |
| Pompe Forage 1 (kW) | 4,9 | 4,9 | 4,9 | 4,9 | 4,9 | 4,9 | 4,9 | 4,9 | 4,9 | 4,9 | 4,9 | | 4,90 | 4,90 | 4,90 | 4,90 | 4,90 | 4,90 | 4,90 | 4,90 | 4,9 | 4,90 | 4,90 | |
| Pompe Forage 2 (kW) | | | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 |
| Somme des puissances (kW) | 9,40 | 9,40 | 11,8 | 11,8 | 11,80 | 11,80 | 11,8 | 11,8 | 11,8 | 11,8 | 11,8 | 6,9 | 7,3 | 11,8 | 2,4 |

Annexe 12: Statistique en eau Vohemar

| PRODUCTION (millier m3) | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| PRODUCTION BRUTE | 270 | 260 | 239 | 309 | 210 | 231 | 218 | 247 | 220 | 219 |
| Pointe hydraulique (m3 /an) | 4 198 | 9 518 | 9 459 | 709 | 602 | 637 | 670 | 890 | 764 | 736 |
| PRODUCTION NETTE | 253 | 263 | 239 | 229 | 159 | 187 | 199 | 227 | 208 | 193 |
| ENERGIE-COMBUSTIBLES-LUBRIFIANT | | | | | | | | | | |
| Electricité (MWh) | 66 | 83 | 74 | 64 | 45 | 60 | 61 | 83 | 84 | 64 |
| Gasoil (millier litre) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Huile (millier litre) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| cout de kWh par ans | 56949370 | 71 344 210 | 64 279 692 | 55468 462 | 38 546 758 | 51464 142 | 52 901 900 | 71 831 805 | 72 216 703 | 55 546 995 |
| PRODUITS DE TRAITEMENT | | | | | | | | | | |
| Sulfate (tonne) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Chaux (tonne) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Hypochlorite (tonne) | 0,461 | 0,777 | 0,395 | 0,736 | 0,500 | 0,391 | 0,468 | 0,492 | 0,341 | 0,260 |
| Sel (tonne) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VENTES (millier m3) | 196 | 180 | 178 | 175 | 126 | 135 | 154 | 178 | 162 | 158 |
| VENTE EN kAr | 110348 | 114413,3482 | 120971,0756 | 115770,52 | 98448,82453 | 99300,485 | 110285,852 | 121143,7348 | 112691,6279 | 123302,388 |
| ABONNES TOT | 578 | 573 | 580 | 609 | 616 | 628 | 644 | 673 | 695 | 704 |
| RECETTES (Million Ariary) | 113 | 115 | 121 | 114 | 99 | 99 | 111 | 120 | 114 | 123 |

Annexe 13: statistique moyenne, PIC et simulation production journalière éolienne





Annexe 14: Calcul du Génie Civil

Les calculs du Génie Civil sont les calculs de tous les efforts agissant sur le mât, la surface de la semelle de fondation et ancrage des haubans, et les volumes du béton nécessaires.

Les projections suivant les deux axes sont telles que :

$$\text{Sur } x : F = T_x + R_x$$

$$\text{Sur } y : P + T_y = R_y$$

Les moments de ces forces par rapport au point A sont reliés par la relation :

$$T_x * h = F * H \quad \text{Où} \quad T_x = F \frac{H}{h}$$

Or

$$\tan \beta = \frac{b}{h} = \frac{T_x}{T_y}$$

Donc

$$T_y = \frac{T_x}{\tan \beta} = \frac{F}{\tan \beta} \frac{H}{h} = \frac{FH}{b}$$

On obtient alors :

$$R_x = f - T_x = F - F \frac{H}{h} = F \left(1 - \frac{H}{h}\right)$$

$$R_y = P + \frac{F}{\tan \beta}$$

$$\text{La réaction du sol } \vec{R} : \quad R_x = F - F \frac{H}{h}$$

$$R_y = P + \frac{F}{\tan \beta} = P + \frac{FH}{b}$$

La tension résultante du câble \vec{T}

$$T_C = \sqrt{T_x^2 + T_y^2} = T_x \sqrt{1 + \frac{1}{\tan^2 \beta}}$$

$$T_C = F \times \left(\frac{H}{h}\right) \sqrt{1 + \frac{1}{\tan^2 \beta}}$$

Annexe 15: capacité portante du sol

| Nature du sol | Capacité portante du sol en MPa |
|---|--|
| Roches peu fissurées saines non désagrégées de stratification favorable | 0,75 à 4,5 |
| Terrain non cohérent à bonne compacité | 0,35 à 0,75 |
| Terrain non cohérent à bonne non compacité | 0,20 à 0,40 |
| Argile | 0,03 à 0,30 |

Annexe 16: caractéristiques de la nouvelle pompe de surface du puits

| | |
|---------------------|-------------------|
| Pompe solaire | 4,5 kW |
| Tension max. | 375 V |
| Tension min | 238 V |
| Tension de sortie | 3 phases AC 400 V |
| Courant de sortie | 17 A |
| Puissance de sortie | 4,5 KW |
| Fréquence de sortie | 0-87 Hz |
| Rendement | 98% max |
| Général | |
| Protection | IP68 |
| Ecran | LDC |
| Installation | Murale |

| | |
|------------------------------------|----------------------------|
| Isolation | 2500 Vrms/1min |
| Environnement | |
| Température ambiant | -40°C à 50°C |
| Altitude | 2000 m (100% de puissance) |
| Température de fonctionnement max. | 80°C |

Annexe 17: caractéristiques de la nouvelle pompe immergée du forage F1

| | |
|---------------------|-------------------|
| Pompe solaire | 4,9 kW |
| Tension max. | 380 V |
| Tension min | 238 V |
| Tension de sortie | 3 phases AC 400 V |
| Courant de sortie | 14 A |
| Puissance de sortie | 4,9 KW |
| Fréquence de sortie | 0-87 Hz |
| Rendement | 98% max |
| Général | |
| Protection | IP68 |
| Ecran | LDC |
| Installation | Murale |

| | |
|------------------------------------|----------------------------|
| Isolation | 2500 Vrms/1min |
| Environnement | |
| Température ambient | -30°C à 50°C |
| Altitude | 2000 m (100% de puissance) |
| Température de fonctionnement max. | 80°C |

Annexe 18: caractéristiques de la nouvelle pompe immergée du forage F2

| | |
|---------------------|-------------------|
| Pompe solaire | 2,4 kW |
| Tension max. | 375 V |
| Tension min | 238 V |
| Tension de sortie | 3 phases AC 400 V |
| Courant de sortie | 14 A |
| Puissance de sortie | 2,4 KW |
| Fréquence de sortie | 0-87 Hz |
| Rendement | 98% max |
| Général | |
| Protection | IP68 |
| Ecran | LDC |
| Installation | Murale |

| | |
|------------------------------------|----------------------------|
| Isolation | 2500 Vrms/1min |
| Environnement | |
| Température ambiante | -40°C à 50°C |
| Altitude | 2000 m (100% de puissance) |
| Température de fonctionnement max. | 80°C |

Annexe 19: calculs des câbles

Calcul d'un câble DC

Entrer les valeurs principales

coef. Températures aux conditions STC

| | |
|---------------------------|--------|
| Matériaux conducteur | Cuivre |
| Intensité I_{mpp} . (A) | 61,11 |
| Tension U_{mpp} . (V) | 360 |

Entrer la section ou la longueur du câble

| | |
|----------------------------------|----|
| Section du conducteur (mm^2) | 16 |
| Longueur du câble (m) | 20 |

Calculer la longueur

Calculer la section

Calcul d'un câble AC

Entrer les quatre valeurs principales

| | |
|-----------------------------------|-----------|
| Puissance de l'onduleur (kW) | 22 |
| Tension d'injection de l'onduleur | 400 V tri |
| Matériau conducteur | 360 |
| Longueur du câble (m) | 15 |

Section calculée du conducteur

Chute de tension résultante 3,06 V

Annexe 20: BDE (bordereaux Devis Estimatifs)

| Désignation | Unité | Qté | PU (Euro) | MONTANT HT (Euros) |
|---|-------|------|--------------|-----------------------|
| A-La machine (éolienne) et les accessoires | | | | |
| Corps de la machine | U | 1 | 24750 | 24750 |
| Câble DC | m | 20 | 2,04 | 40,82 |
| Câble AC | m | 15 | 0,18 | 1,82 |
| Sous total A | | | | 24792,64 |
| B- Les matérielles électroniques | | | | |
| Convertisseur de 5,63 KVa | kVa | 1 | 699 | 1 048,50 |
| Convertisseur de 6,13 KVa | kVa | 1 | 945 | 1 417,50 |
| Convertisseur de 3 KVa | kVa | 1 | 342 | 513,00 |
| PRESSOSTAT | U | 1 | 52,00 | 52,00 |
| Coffret protection AC (avec parafoudre, et coupleur de phase) | U | 1 | 845,00 | 845,00 |
| Lot de mise à la terre avec câble et accessoires | U | 5 | 110,50 | 552,00 |
| Inverseur automatique | U | 3 | 477,00 | 1431,00 |
| Sous total B | | | | 4866,00 |
| C- les pompes | | | | |
| Pompe solaire de surface | U | 1 | 9 450,00 | 9 450,00 |
| Pompe solaire immergée du forage F1 | U | 1 | 9 397,00 | 9 397,00 |
| Pompe solaire immergée du forage F2 | U | 1 | 8750,00 | 8750,00 |
| Sous total C | | | | 27 597,00 |
| D-Coûts de génie civil | | | | |
| Pour la fondation | | | | |
| Ensemble structure support | U | 1 | 4 500,00 | 4 500,00 |
| Béton semelle dosé à 350 kg/m3 | m3 | 4,5 | 166 | 748 |
| Coffrage | U | 1 | 4 | 4 |
| Sous total D | | | | 5 252 |
| E-Coûts des matériaux du mât tubulaire haubané | | | | |
| Haubans (18m) de 13,27 mm de diamètre | m | 72 | 0,8 | 57,6 |
| Béton d'ancrage | m3 | 5,16 | 166 | 856,56 |

| | | | | |
|-----------------------------------|---|----|--------|------------------|
| Serres-câble | U | 15 | 0,25 | 3,75 |
| Sous total E | | | | 917,91 |
| F-clôture du champ | | | | |
| Clôture du champ | U | 1 | 650,00 | 650,00 |
| Sous total F | | | | 650,00 |
| Montant TOTAL | | | | 67 640,55 |
| TVA 20% | | | | 13 528 |
| Montant total TTC en Euros | | | | 80 000 |

TABLE DES MATIERES

| | |
|--|-------------|
| DECLARATION SUR L'HONNEUR | i |
| REMERCIEMENTS | ii |
| SOMMAIRES | iii |
| LISTE DES TABLEAUX | iv |
| LISTE DES ILLUSTRATIONS | v |
| LISTE DES ANNEXES | viii |
| LISTE DES ABREVIATIONS | ix |
| LISTE DES UNITES | x |
| INTRODUCTION | 1 |
| PARTIE I | 3 |
| CHAPITRE - I. DESCRIPTION DU PROJET | 4 |
| I.1. Terme de référence du projet | 4 |
| I.2. Localisation du site de projet | 5 |
| CHAPITRE - II. L'ENERGIE EOLIENNE | 7 |
| II.1. Notion d'énergies renouvelables | 7 |
| II.2. Historique de l'éolienne | 8 |
| II.3. Présentation théorique d'une éolienne | 8 |
| II.3.1. Origine du vent | 8 |
| II.3.2. Mesure et hauteur du capteur du vent | 9 |
| II.3.2.1. Mesure..... | 9 |
| II.3.2.2. La hauteur de capteur du vent | 11 |

| | |
|--|-----------|
| II.3.3. Choix du site de l'implantation d'une éolienne | 13 |
| II.3.3.1. Critère naturel | 14 |
| II.3.3.2. Autre critère | 14 |
| II.3.4. Les principaux composants d'une éolienne | 18 |
| II.3.5. Les différents types d'éolienne | 20 |
| II.3.5.1. L'éolienne à axe horizontal..... | 20 |
| II.3.5.2. L'éolienne à axe vertical :..... | 23 |
| II.3.6. Configuration des pales..... | 25 |
| II.3.6.1. Etude préliminaire de mécanique des fluides..... | 25 |
| II.3.6.2. La production possible | 27 |
| II.3.7. Fonctionnement de l'éolienne classique | 27 |
| PARTIE II..... | 30 |
| ETUDE DE LA MISE EN ŒUVRE D'UN NOUVEAU SYSTEME | |
| D'ALIMENTATION DES POMPES A LA STATION DE PRODUCTION D'EAU | |
| POTABLE DE LA VILLE DE VOHEMAR..... | 30 |
| CHAPITRE - III. CALCULS TECHNIQUES DIMENSIONS ELECTRIQUES | 31 |
| III.1. Données du projet et caractéristiques du site | 31 |
| III.1.1. Données du projet | 31 |
| III.1.1.1. Les sources..... | 31 |
| III.1.1.2. Autres charges existants..... | 34 |
| III.1.2. Caractéristiques du site d'étude | 35 |
| III.1.2.1. Étude des besoins en eau VOHEMAR | 35 |

| | |
|--|----|
| III.1.2.2. Energie hydraulique nécessaire..... | 35 |
| III.1.3.Calculs des besoins en énergie..... | 36 |
| III.2. Dimensionnement d'une installation éolienne..... | 36 |
| III.2.1.Note théorique de calcul | 36 |
| III.2.1.1. Puissance fournies par la pompe..... | 36 |
| III.2.1.1. Puissance théorique d'éolienne..... | 37 |
| III.2.1.2. Energie éolienne..... | 39 |
| III.2.2.Choix de machine (éolienne) | 44 |
| III.2.2.1. Les caractéristiques de l'éolienne | 44 |
| III.2.2.1. Courbe de puissance | 46 |
| III.2.3.Adaptation de l'éolienne PERFEO-20000 à Madagascar..... | 46 |
| III.2.4.Transmission mécanique..... | 48 |
| III.2.5.Choix des convertisseurs ou onduleurs (AC/DC-DC/AC) -U et I..... | 49 |
| III.2.5.1. Choix du convertisseur | 49 |
| III.2.5.2. Caractéristique de chaque convertisseur..... | 50 |
| III.2.5.3. Schéma de connexion en autoconsommation | 53 |
| III.2.6.Choix des pompes solaires..... | 53 |
| III.2.6.1. Pompe classique..... | 53 |
| III.2.6.2. La courbe caractéristique de la pompe de surface du puits | 54 |
| III.2.6.3. La courbe caractéristique de la pompe immergée du forage F1 | 55 |
| III.2.6.4. La courbe caractéristique de la pompe immergée du forage F2 | 56 |
| III.2.6.5. Pompe à fréquence variable | 56 |

| | |
|---|-----------|
| III.3. Inverseur..... | 63 |
| III.4. Détermination des accessoires | 63 |
| III.4.1.CABLES | 64 |
| III.4.1.1. Calcul d'un câble DC..... | 64 |
| III.4.1.2. Calcul d'un câble AC..... | 64 |
| III.4.2.Entretien d'une éolienne | 65 |
| III.4.2.1. La maintenance préventive : | 65 |
| III.4.2.2. La maintenance curative : | 66 |
| III.4.2.3. La maintenance conditionnelle : | 66 |
| CHAPITRE - IV. CALCULS TECHNIQUES DIMENSIONS HYDRAULIQUE..... | 67 |
| IV.1. Elaboration du modèle VOHEMAR sur Epanet | 67 |
| IV.1.1. Introduction du logiciel Epanet | 67 |
| IV.1.2. Elaboration du modèle VOHEMAR sur Epanet..... | 67 |
| IV.2. Simulation de fonctionnement | 68 |
| IV.2.1. Simulation de fonctionnement actuel | 68 |
| IV.2.1.1. Débit avant d'entrée au réseau (arc 8) | 70 |
| IV.2.1.2. Vitesse (arc 8) | 70 |
| IV.2.1.3. Pression | 71 |
| IV.2.1.4. Courbe de modulation..... | 72 |
| IV.2.1.5. Courbe variation réservoir | 74 |
| IV.2.2. Simulation de fonctionnement avec éolienne en cas de vitesse du vent défavorable (au mois de février) | 82 |

| | |
|---|-----------|
| IV.2.2.1. Représentation des débits refoulés par la pompe en février..... | 84 |
| IV.2.2.2. Courbe de remplissage de réservoir | 84 |
| IV.3. Comparaison entre la simulation avec éolienne et la simulation sans éolienne..... | 86 |
| CHAPITRE - V. CALCUL DE LA FONDATION EOLIENNE | 87 |
| V.1.Efforts agissant sur le mât | 87 |
| V.2.La surface de la semelle | 88 |
| V.3.Résultats | 89 |
| PARTIE III..... | 92 |
| EVALUATION FINANCIERE DU PROJET | 92 |
| CHAPITRE - VI. EVALUATION FINANCIERE DU PROJET | 93 |
| VI.1. Devis estimatif | 93 |
| VI.1. Préambule à l'analyse financière | 94 |
| VI.1.1. Hypothèses de calcul : | 94 |
| VI.1.2. Remarque sur le flux trésorerie | 97 |
| CONCLUSION..... | 98 |
| BIBLIOGRAPHIE..... | 99 |
| ANNEXE | I |