

ARCHIPEL DES TUAMOTU

CARACTERISATION DU GISEMENT EOLIEN

&

EVALUATION TECHNIQUE ET FINANCIERE

DE L'ELECTRIFICATION PAR SYSTEME

EOLIEN AUTONOME

ETUDE ADEME N° 00.42.009

SOMMAIRE

CONTEXTE GENERAL DE L'ETUDE.....	3
GENERALITES	5
I • GENERALITES SUR LE REGIME DES VENTS	5
II • CARACTERISTIQUES GENERALES DES BESOINS	5
DONNEES METEOROLOGIQUES – GISEMENT EOLIEN	6
I • ANALYSE DES MESURES METEO FRANCE.....	6
I.1 • Analyse globale	6
I.2 • Traitement des données sur la station de Rangiroa.....	6
I.3 • Traitement des données sur la station de Takaroa	8
I.4 • Traitement des données sur la station de Hao.....	9
I.5 • Traitement des données sur la station de Moruroa	11
II • ANALYSE DES MESURES METEO SATELLITE	12
III • PREMIERES CONCLUSION SUR LE GISEMENT EOLIEN DES TUAMOTU	13
LOCALISATION DES SITES DE MESURE	14
RAPPORT D'INSTALLATION DES MATS DE MESURE	15
I • RAPPEL DES OBJECTIFS DE LA CONVENTION.....	15
II • DEROULEMENT CHRONOLOGIQUE DE LA CONVENTION	15
III • RAPPEL DES SITES RETENUS	16
IV • CONDITIONS DE DEROULEMENT DES CHANTIERS.....	18
ANALYSE DES MESURES REALISEES PAR SOLER ENERGIE.....	20
I • DESCRIPTIF DES MESURES.....	20
I.1 • Stations d'acquisition	20
I.2 • Durée et qualité des mesures.....	20
II • SYNTHESE DES MESURES SUR LA PERIODE.....	21
II.1 • Vitesses de vent.....	21
II.2 • Direction du vent	22
II.3 • Turbulence du vent	22
II.4 • Gradient vertical de la vitesse	24
II.5 • Première conclusion.....	25
III - CORRELATION DES MESURES AVEC LES STATIONS METEO FRANCE.....	26
I • CORRELATIONS SUR LA PERIODE DE MESURES	26
II • COMPARAISON DE LA PERIODE DE MESURE AVEC LES STATISTIQUES SUR LE LONG TERME.....	28
CALCUL DU GISEMENT EOLIEN SUR LES TUAMOTU	30
I • GISEMENT EOLIEN A 30 METRES AU DESSUS DU SOL	30
I.1 • Sur les sites de Mesure	30
I.2 • Répartition du gisement sur l'archipel des Tuamotu.....	30
II • CALCUL DE LA VITESSE AU DELA DE 30 METRES DE HAUTEUR	31
V – CONCLUSION SUR LE GISEMENT EOLIEN	32
I • INTERET DE LA SOLUTION EOLIENNE.....	32
II • PRODUCTIBLE A 30 METRES	32

DIMENSIONNEMENT D'UNE SOLUTION TECHNIQUE	33
<i>I.1 • Type de système</i>	<i>33</i>
<i>I.2 • Matériel</i>	<i>34</i>
EVALUATION FINANCIERE DU PROJET	38
I • CHOIX DU SYSTEME D'ANCRAGE	38
<i>I.1 • Option 1 : embase du mât plus ancrages poids pour les haubans.....</i>	<i>38</i>
<i>I.2 • Option 2 : embase du mât plus ancrages scellés pour les haubans.....</i>	<i>38</i>
II • ESTIMATION DU BUDGET DE L'OPERATION.....	38
III • COMPARAISON AVEC UNE ELECTRIFICATION SOLAIRE AUTONOME.....	39
IV • COMPARAISON AVEC UN SYSTEME HYBRIDE SOLAIRE – DIESEL	41
CONCLUSION.....	46
ANNEXES.....	47

CONTEXTE GENERAL DE L'ETUDE

L'archipel des Tuamotu est constitué de plusieurs dizaines d'îles de petites dimensions et s'étend sur une superficie de près de 800.000 km². Les besoins en énergie sont de ce fait très dispersés et la solution apportée doit être comparable à une électrification décentralisée. Actuellement, en matière d'énergie renouvelable, l'énergie solaire est prépondérante dans l'archipel mais l'énergie éolienne pourrait dans certains cas être associée aux solutions photovoltaïques, voire se substituer à celles-ci lorsque les conditions sont favorables.

Pour ce faire, la société VERGNET SA a développé une collaboration avec Soler Energie afin de présenter une meilleure représentativité de l'offre technique française en matière d'énergies renouvelables sur le territoire. Cette alliance permet en effet d'allier la forte présence de terrain de Soler Energie en Polynésie avec la compétence de Vergnet dans la fourniture de matériel éolien de petite et moyenne puissance. L'application ciblée en premier lieu concerne l'alimentation de sites isolés dans les Tuamotu avec la possibilité d'étendre cette collaboration aux projets de systèmes hybrides solaire/éolien développés actuellement par Soler Energie.

La société Vergnet SA a racheté en 1989 la société AEROWATT, mondialement connue dans le domaines des aérogénérateurs de petite puissance. Depuis cette date, de très gros efforts techniques ont été entrepris pour rationaliser la gamme d'aérogénérateurs existants, puis pour développer de nouveaux produits plus puissants. La gamme d'aérogénérateurs VERGNET s'étend maintenant de 5 à 275 kW, avec des applications d'électrification isolée et de couplage aux réseaux diesel. VERGNET est reconnu comme le premier fabricant mondial d'aérogénérateurs de petite et moyenne puissance.

La société Soler Energie, qui dispose d'un réseau dense sur les Tuamotu et a montré sa capacité à installer et maintenir des installations solaires dans un contexte difficile de dispersion géographique, est à même de proposer des produits VERGNET en complément du solaire photovoltaïque, lorsque le contexte est plus favorable à l'éolien (consommation plus importante par exemple, liée à une activité économique artisanale ou commerciale).

Par le biais d'une convention avec le groupement Soler Energie – VERGNET SA, l'ADEME, qui a pour mission de promouvoir le développement des énergies renouvelables, a participé à une partie du financement de l'étude visant à identifier le potentiel éolien des Tuamotu, préalable à la mise en place des premiers projets.

Il faut préciser avant toute chose que, contrairement à une idée largement répandue, il existe a priori un potentiel éolien important dans les îles Tuamotu. L'objet de cette étude est dans un premier temps

de préciser l'importance de ce gisement éolien par l'analyse des données météorologiques existantes, puis de la confirmer par des mesures fiables sur des sites pertinents.

Le présent document présente le Rapport Final de cette étude, comprenant :

- une analyse fine des données météorologiques disponibles sur la zone, débouchant sur une estimation du gisement éolien des Tuamotu,
- l'identification des sites favorables à la mise en place de mâts de mesure de par leur intérêt géographique ou la proximité d'application immédiate d'une solution d'électrification éolienne
- la description de la mise en place des mâts de mesure sur les sites choisis
- l'analyse des campagnes de mesure et corrélation avec les données Météo, extrapolation du gisement sur le long terme
- une proposition technique de système éolien adaptée au contexte de l'archipel et aux conditions de vent,
- une évaluation économique du projet permettant en première approche d'estimer son intérêt par rapport aux solutions actuelles (équipements photovoltaïques).

GENERALITES

I • GENERALITES SUR LE REGIME DES VENTS

Les deux phénomènes principaux qui régissent le climat de la Polynésie française sont :

- la Zone de Convergence Inter Tropicale (ZCIT) qui est le lieu de convergence entre les alizés des hémisphères nord et sud. Cette zone se situe à 15° au nord de l'équateur. Elle est peu ventée et aspire les alizés. C'est en fait l'équateur météorologique ;
- la Zone de Convergence du Pacifique Sud (ZCPS). Elle vient perturber les alizés du Pacifique sud.

La présence de ces deux phénomènes explique pourquoi la Polynésie n'a pas un régime de vent clairement identifié sur l'ensemble de son territoire.

Les îles de la Société sont situées au sein de la Zone de Convergence du Pacifique Sud dont la position varie au cours des saisons. Ainsi, de novembre à mai, les alizés soufflent du nord-est et de juin à octobre, du sud-est. En règle générale, les vents d'ouest sont associés à des perturbations. Ces caractéristiques expliquent le faible gisement éolien de l'archipel et son caractère aléatoire.

L'archipel des **Tuamotu** se situe entre les deux zones de convergence. Les alizés sont de secteur est, voire est-nord-est, stables tout au long de l'année.

II • CARACTERISTIQUES GENERALES DES BESOINS

Le contexte énergétique retenu pour le calibrage des installations (aérogénérateurs et batteries de stockage) se base sur trois modèles de consommation correspondant à trois situations « standard » : 1 habitation, qui consomme environ 5 kWh/jour, 1 petite entreprise (ferme perlière ou pension) qui consomme environ 40 kWh/jour et 1 village, pour une consommation moyenne de 150 kWh/jour. Pour satisfaire au mieux les besoins futurs, il est possible d'estimer, à moyen et long termes, un taux d'accroissement de la demande en électricité de l'ordre de 2% par an. Dans cette optique, on peut envisager les besoins futurs aux diverses échéances de la façon suivante :

	Habitation	entreprise	village
➤ 2005 :	5 kWh/j	44 kWh/j	165 kWh/j
➤ 2010 :	6 kWh/j	49 kWh/j	180 kWh/j
➤ 2015 :	7 kWh/j	54 kWh/j	200 kWh/j
➤ 2020 :	8 kWh/j	60 kWh/j	220 kWh/j

DONNEES METEOROLOGIQUES – GISEMENT EOLIEN

I ● ANALYSE DES MESURES METEO FRANCE

I.1 ● ANALYSE GLOBALE

Quatre stations météorologiques de référence ont été choisies en première approche pour effectuer cette étude. Il s'agit de stations de Hao, Takaroa, Rangiroa et Moruroa. Ce choix est justifié par le fait que leur position permet d'avoir un quadrillage représentatif de l'archipel et les données de vent qui y sont enregistrées présentent un échantillonnage cohérent (vitesse du vent et direction) sur une longue période (entre 9 et 24 années de mesures). De plus, trois d'entre-elles sont situées à proximité des sites retenus pour les éoliennes du projet pilote. La localisation géographique des stations Météo France est indiquée sur la carte jointe.

L'étude des mesures trihoraires sur les quatre stations météo montre des caractéristiques de vent au sol différentes quant à la vitesse moyenne mais relativement proches si l'on s'attache aux paramètres de régularité et de pointe horaire ou saisonnière. On remarque que le vent est assez régulier au cours de l'année sur l'ensemble des stations avec toutefois un maximum bien marqué au cours du mois d'août. Sur les trois premières stations météo, on enregistre un maximum du vent entre 8 heures et 14 heures quel que soit le mois considéré sur une période de référence de 24 ans. Seule la station de Moruroa montre un étalement des vents forts jusqu'en fin d'après-midi. Les écarts diurnes sont la plupart du temps modérés et ne dépassent pas 0,6 m/s excepté à Rangiroa où l'amplitude entre les vitesses du vent au cours des périodes les plus ventées (fin de matinée) et les périodes les plus calmes (entre 2 heures et 5 heures du matin) atteignent 0,9 m/s.

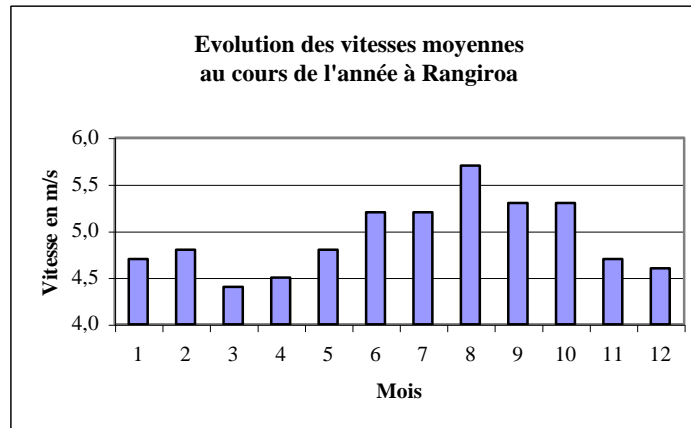
Enfin, l'observation des fréquences des directions montre clairement que la majorité des vents, toutes vitesses confondues, soufflent de l'est, voire de l'est-nord-est. Ainsi, 57% des vents de vitesse supérieure à 6 m/s enregistrés sur les stations de Hao et Rangiroa soufflent d'une direction comprise entre 60° et 100°. Sur la station de Takaroa, ce pourcentage est de 72%.

I.2 ● TRAITEMENT DES DONNEES SUR LA STATION DE RANGIROA

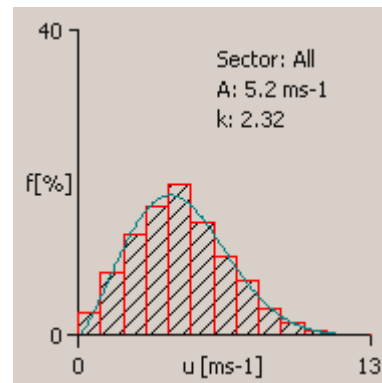
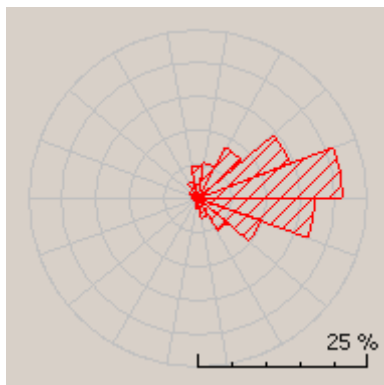
Sur la station météorologique de Rangiroa, une étude statistique a été effectuée sur les vitesses de vent enregistrées à 10 mètres de hauteur au cours d'une période de référence de 5 ans. Les vitesses se répartissent comme suit :

- vents inférieurs à 4 m/s : 24%
- vents de vitesse comprise entre 4 et 8 m/s : 64%
- vents de vitesses supérieures à 8 m/s : 12%.

Dans 76% des cas, le vent mesuré a donc soufflé à une vitesse supérieure à 4 m/s. La vitesse moyenne au cours de cette période a été de 5,1 m/s. Le tableau suivant montre l'évolution des vitesses moyennes du vent en fonction de la période de l'année. Les valeurs sont des moyennes intégrées sur une durée de 18 ans.



C'est sur cette station que les vitesses descendent sous le seuil de 5 m/s durant une aussi longue période (de novembre à mai) avec un minimum (4,4 m/s) au cours du mois de mars. De même, contrairement à ce qui a été observé sur les autres stations, les écarts entre les périodes les plus ventées (fin de matinée) et les périodes les moins ventées (milieu de la nuit) sont assez importantes (entre 0,5 et 0,9 m/s). La rose des vents et la courbe de fréquence sont indiquées ci-dessous.



La vitesse moyenne du vent sur le site de la station de Rangiroa est donnée par la formule suivante :

$$V \text{ moyen} = A \cdot \gamma(1+1/k)$$

Elle est donc de 5,2 m/s à 10 mètres au-dessus du sol avec une valeur du coefficient k de Weibull égal à 2,32.

Or les aérogénérateurs VERGNET sont installés sur des mâts standards de 30 mètres de hauteur, avec possibilité d'utiliser des mâts de 40 mètres.

Pour obtenir une valeur calculée du gisement éolien à 30 ou 40 mètres de hauteur, nous utiliserons la formule suivante :

$$V_z/V_i = (z/i)^\alpha.$$

- V_z : vitesse du vent cherchée à la hauteur z .
- V_i : vitesse de vent connue à la hauteur de référence i .
- α : coefficient de rugosité du terrain en amont du point de mesure.

Le coefficient de rugosité dépend de la nature de l'environnement en amont du point de mesure, donc des divers obstacles qui peuvent perturber l'écoulement du vent. Ce coefficient est très faible sur les plans d'eau ou sur les surfaces lisses et sans végétation. Il sera d'autant plus important que le site est encombré de buissons, d'arbres ou de constructions diverses. On admet généralement les valeurs suivantes pour α :

- Mer : 0,01
- Terrains plats et lisses : 0,07
- Zones aéroportuaires avec très peu de bâtiments et d'arbres : 0,15
- Terrains avec peu de bâtiments ou d'arbres : 0,20
- Forêt : 0,4

Dans le cas de la station de Rangiroa, située sur l'aéroport, nous avons :

- $i = 10$ mètres,
- $z = 30$ mètres,
- $V_i = 5,2$ m/s,
- $\alpha = 0,2$.

La vitesse moyenne du vent sera donc de **5,7 m/s** à 30 mètres de hauteur sur le site de Rangiroa.

Le calcul à 40 mètres de hauteur donne un V_{moyen} de **6,1 m/s**.

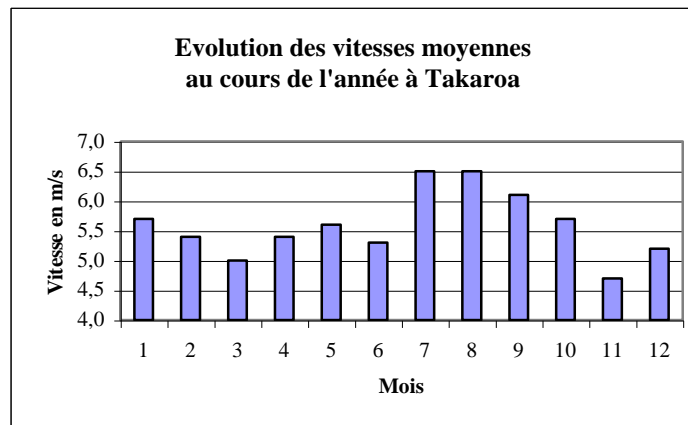
I.3 • TRAITEMENT DES DONNEES SUR LA STATION DE TAKAROA

Sur la station météorologique de Takaroa, les vitesses de vent trihoraires enregistrées au sol au cours de une période de référence de 11 ans se répartissent comme suit :

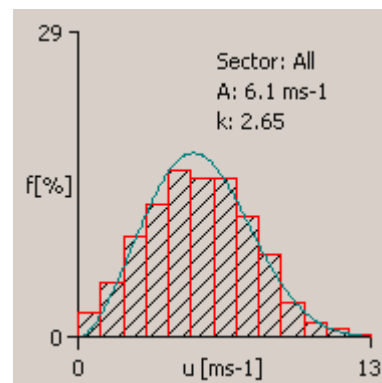
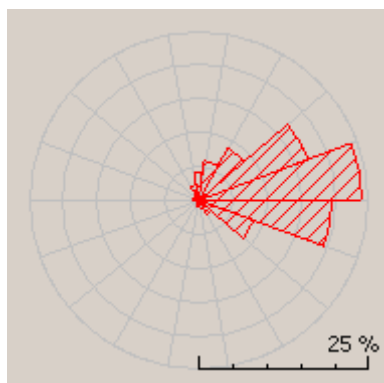
- vents inférieurs à 4 m/s : 22%
- vents de vitesse comprise entre 4 et 8 m/s : 56%
- vents de vitesses supérieures à 8 m/s : 22%.

Dans 78% des cas, le vent mesuré a donc soufflé à une vitesse supérieure à 4 m/s. La vitesse moyenne au cours de cette période a été de 5,6 m/s.

Le tableau suivant montre l'évolution des vitesses moyennes du vent en fonction de la période de l'année. Les valeurs sont des moyennes intégrées sur une durée de 23 ans.



Sur cette station, on constate un creux important au mois de novembre avec des vitesses moyennes de 4,7 m/s et un second creux moins marqué au mois de mars (5,0 m/s). En moyenne, les écarts entre les périodes les plus ventées (fin de matinée) et les périodes les moins ventées (entre minuit et 2h du matin) sont faibles, de l'ordre de 0,4 à 0,6 m/s. La rose des vents et la courbe de fréquence sont indiquées ci-dessous.



La vitesse moyenne du vent sur le site de Takaroa est de 5,4 m/s à 10 m au-dessus du sol avec un coefficient de Weibull, $k = 2,65$.

Le calcul de la vitesse moyenne du vent donne **6,8 m/s** à 30 mètres et **7,2 m/s** à 40 mètres au-dessus du sol.

I.4 • TRAITEMENT DES DONNEES SUR LA STATION DE HAO

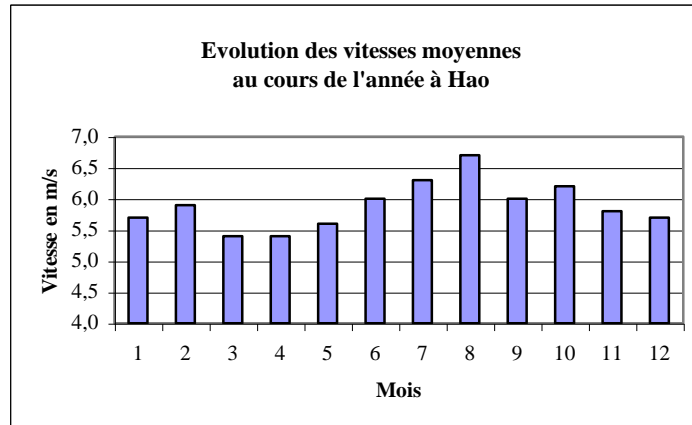
Sur la station météorologique de Hao, les vitesses de vent trihoraires enregistrées au sol au cours d'une période de référence de 11 ans (2 928 observations par mois) se répartissent comme suit :

- vents inférieurs à 4 m/s : 13%
- vents de vitesse comprise entre 4 et 8 m/s : 64%

➤ vents de vitesses supérieures à 8 m/s : 23%.

Dans 87% des cas, le vent mesuré a donc soufflé à une vitesse supérieure à 4 m/s. La vitesse moyenne au cours de cette période a été de 5,9 m/s.

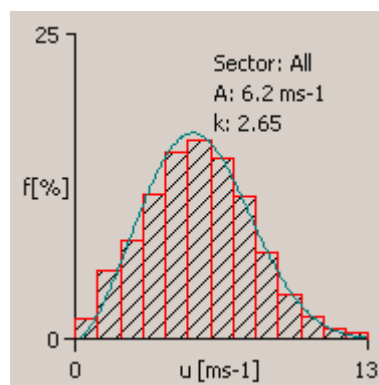
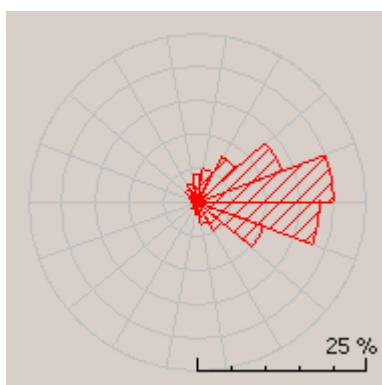
Le tableau suivant montre l'évolution des vitesses moyennes du vent à 10 mètres du sol en fonction de la période de l'année. Les valeurs sont des moyennes intégrées sur une durée de 24 ans.



Les moyennes sont assez élevées et régulières tout au long de l'année. Les deux seuls mois où la vitesse moyenne descend légèrement sous le seuil de 5,5 m/s sont les mois de mars et avril.

En moyenne, les écarts entre les périodes les plus ventées (fin de matinée) et les périodes les moins ventées (entre 2h et 5h du matin) sont très faibles (toujours inférieurs à 0,5 m/s).

La rose des vents et la courbe de fréquence pour la période sont indiquées ci-après.



La vitesse moyenne du vent sur le site de Hao est de 6,2 m/s avec $k = 2,65$.

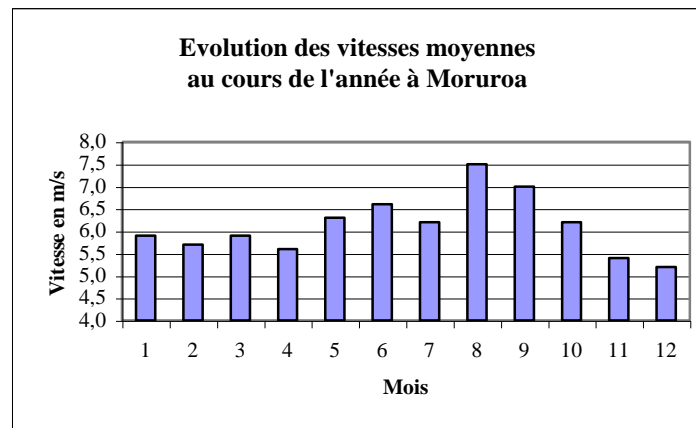
Le calcul de la vitesse moyenne du vent donne **6,9 m/s** à 30 mètres et **7,3 m/s** à 40 mètres au-dessus du sol.

I.5 • TRAITEMENT DES DONNEES SUR LA STATION DE MORUROA

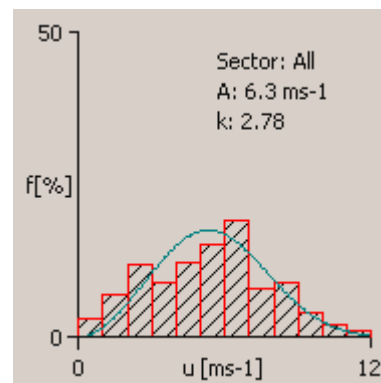
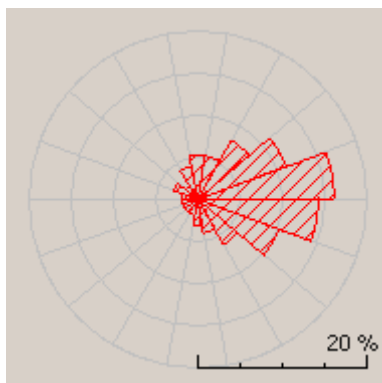
Sur la station météorologique de Moruroa, les vitesses de vent enregistrées au cours d'une période de référence de 3 ans se répartissent comme suit :

- vents inférieurs à 4 m/s : 16%
- vents de vitesse comprise entre 4 et 8 m/s : 57%
- vents de vitesses supérieures à 8 m/s : 27%.

La vitesse moyenne sur cette même période a été de 6 m/s. Le tableau suivant montre l'évolution des vitesses moyennes du vent en fonction des mois sur une période de 10 ans.



Même au cours des mois moins ventés (novembre et décembre), les vitesses moyennes restent supérieures à 5 m/s. C'est sur cette station que les vitesses mensuelles les plus fortes ont été enregistrées (7,5 m/s de moyenne au mois d'août). En moyenne, les écarts entre les périodes les plus ventées (début d'après midi) et les moins ventées (milieu de la nuit) sont faibles (inférieur à 0,5 m/s). La rose des vents et la courbe de fréquence établies sur une période 5 ans sont indiquées ci-dessous.



La vitesse moyenne du vent sur le site de Moruroa est de 6,3 m/s avec $k = 2,78$. Le calcul de la vitesse moyenne du vent donne **7,0 m/s** à 30 mètres et **7,4 m/s** à 40 mètres au-dessus du sol.

II • ANALYSE DES MESURES METEO SATELLITE

En complément de l'approche classique basée sur les observations des stations Météo France, VERGNET a développé au cours de l'année 2000 un outil de collecte et de traitement des données météorologiques issues des observations satellites. Ces données ont plusieurs origines :

- de mesures effectuées à partir de satellites utilisés dans le cadre du « Defense Meteorological Satellite Program »
- de données de vent provenant du Centre Européen de Prévisions Météorologiques à Moyen Terme,
- de données brutes mesurées sur des bateaux feux ou des bouées des centres de météorologies nationales.

Une importante phase de traitement est nécessaire avant d'obtenir des fichiers de vent exploitables. Ces résultats sont ensuite précieux pour identifier le potentiel éolien d'une large zone comme l'archipel des Tuamotu. Ces résultats présentent un certain nombre d'avantages :

- les mesures de vent sont données selon un maillage de 200 x 250 km,
- les données sont à 10 mètres au-dessus de l'océan, donc sans aucune perturbation,
- elles permettent de compléter les points Météo France.

Dans le cas des Tuamotu, le traitement a été fait sur une surface qui couvre tous les atolls de l'archipel, c'est à dire entre les longitudes 150°O et 137,5°O et entre les latitudes 14°S et 22°S au cours de la période 1994-1998, de façon à visualiser le gisement éolien sur l'ensemble des Tuamotu.

Au terme de cette première phase d'étude, il apparaît que les données satellites montrent une bonne cohérence de valeurs avec les données Météo France.

A Takarua par exemple, la vitesse moyenne du vent à 30 mètres de hauteur, estimée à partir des fichiers Météo France, est de 6,8 m/s. La valeur obtenue après traitement des données satellite est de 6,6 m/s, soit un écart de 0,2 m/s qui correspond à 3% de différence.

A Hao, les deux valeurs sont également très proches, 6,9 m/s (valeur Météo France) et 6,7 m/s (valeur calculée à partir des données satellite).

Les résultats montrent globalement que la vitesse moyenne du vent diminue du sud-est vers le nord-ouest de l'archipel (voir carte jointe).

- Dans la partie sud-est (atolls de Moruroa, Tureia, Tenarunga), les vitesses moyennes à 30 mètres de hauteur varient entre 6,6 et 7,0 m/s.
- Dans la partie centrale (atoll de Hao), les vitesses moyennes sont de l'ordre de 6,3 à 6,7 m/s.
- Dans la partie nord-ouest (atolls de Rangiroa, Takarua, Aratika, Makemo), les vitesses moyennes du vent varient entre 5,9 et 6,5 m/s.

Ces valeurs sont parfaitement cohérentes avec les mesures Météo France obtenues sur les sites de Hao, takaroa, Rangiroa et Moruroa.

La phase suivante de l'étude prévoit l'installation de deux mâts de 30 mètres de hauteur et un mât de 50 mètres avec deux anémomètres et une girouette afin d'affiner les données sur le gisement éolien de la zone. Les quatre stations météo serviront de référence pour effectuer des corrélations. Cela permettra de confirmer ces hypothèses.

III • PREMIERES CONCLUSION SUR LE GISEMENT EOLIEN DES TUAMOTU

Nous avons vu qu'étant donnée l'étendue des Tuamotu, les valeurs mesurées du vent moyen sont différentes en fonction de la localisation géographique du site de mesure. Une étude précise doit tenir compte de la position de l'atoll au sein de l'archipel de façon à cibler les besoins en fonction de la réalité locale du gisement éolien.

Parallèlement à cela, il est possible d'intégrer tous les fichiers vent disponibles (données Météo France et satellite). On obtient alors une vitesse moyenne globale qui, si elle ne permet pas une estimation fine du gisement éolien sur les différents atolls, a le mérite de préciser les caractéristiques générales du potentiel de vent sur les Tuamotu.

En conclusion, on note que la **vitesse moyenne globale** à 30 mètres au-dessus du sol, calculée à partir des données Météo France et Satellite sur l'archipel des Tuamotu, évolue de l'est vers l'ouest :

- 6,8 m/s dans la partie sud-est de l'archipel,
- 6,5 m/s dans la partie centrale,
- 6,2 m/s dans la partie ouest.

Ce gisement est suffisant pour développer un système éolien autonome pour l'électrification des sites isolés sur les atolls de l'archipel des Tuamotu.

Toutefois, il faut noter que ces résultats devront être confirmés par les études menées au cours de la phase II du projet. Dans ce but, rappelons que deux mâts de 30 mètres de hauteur et un mât de 50 mètres seront installés et équipés d'anémomètres et de girouettes.

Les mesures de vent et de direction seront enregistrées durant une année maximum et seront corrélées aux résultats des stations Météo France. A l'issue de cette campagne de mesures, un atlas éolien des Tuamotu sera élaboré.

LOCALISATION DES SITES DE MESURE

Les sites retenus de mise en place des mâts de mesure de la phase II de l'étude, sur l'archipel des Tuamotu sont les suivants :

- Apataki pour un mât de 30 mètres de hauteur
- Takapoto pour un mât de 30 mètres de hauteur
- Hao pour un mât de 50 mètres de hauteur

Leurs localisations géographiques respectives sont précisées sur les cartes du rapport d'installation des mâts de mesure.

Cette distribution présente l'avantage de permettre une bonne "triangulation" de l'archipel des Tuamotu, donc des résultats homogènes et significatifs. Il y a en effet deux stations dans la partie nord-ouest de l'archipel (Apataki et Takapoto) et une station (Hao) dans la partie centrale-sud. Les atolls situés à l'extrême sud-est étant beaucoup moins peuplés, les besoins sont très faibles.

L'environnement autour des points retenus est caractérisé par une végétation basse (2 à 3 mètres de hauteur). Du fait de la morphologie des atolls, aucune accélération du vent liée au relief n'est envisageable. De ce fait, les mesures effectuées seront largement représentatives de leur environnement, car très peu perturbées.

Ce choix de sites de mesures a par ailleurs été guidé par la disponibilité foncière des zones et la présence sur l'atoll de techniciens de Soler Energie afin d'effectuer les relèves de mesures et intervenir sur le boîtier d'acquisition le cas échéant. A ces titres, il n'a pas été possible d'implanter les mâts de mesures sur des sites de consommation, qui était également un des objectifs. Néanmoins, nous verrons en fin d'étude que la répartition du gisement étant très homogène, les résultats seront directement exploitables pour répondre aux besoins des utilisateurs potentiels.

RAPPORT D'INSTALLATION DES MATS DE MESURE

I ● RAPPEL DES OBJECTIFS DE LA CONVENTION

La convention 00 42 009 a pour objet la mesure précise du gisement éolien de la zone des Tuamotus, par la mise en place de mâts de mesure sur trois sites représentatifs de cette zone. La convention a été notifiée le 29 décembre 2000 et a été conclue pour une durée de 14 mois.

Le présent rapport constitue la troisième phase du déroulement de la convention telle que prévue au niveau de son paragraphe 2.2. Ce rapport d'avancement devait intervenir au bout de sept mois après le début de la mise en place de la convention. Ce délai a été augmenté de quatre mois, car le délai de mise en place des mâts de mesure a été fortement retardé par des conditions techniques de mises en œuvres difficiles.

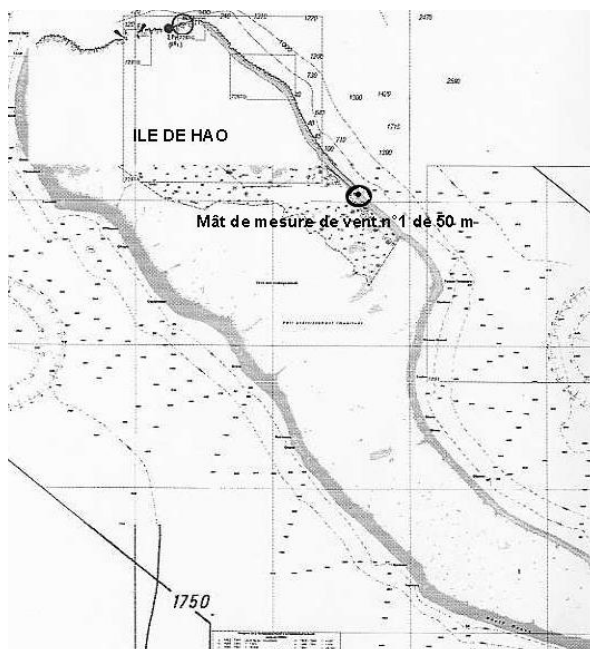
II ● DEROULEMENT CHRONOLOGIQUE DE LA CONVENTION

- Signature de la convention : 29 décembre 2000
- Réception des documents originaux : 2 février 2001
- Etude théorique du gisement éolien sur la base de données météorologiques disponibles, estimation approximative de l'intérêt économique de projets éoliens, choix des sites de mise en place des mâts de mesure. Les trois sites retenus sont les sites de Hao, Takapoto et Apataki.
- Transmission de ce premier dossier d'étude : 9 Avril 2001
- Recherche de sites d'installations, dans les îles retenues, mise en place de convention de mise à disposition des terrains, mise en place de convention définissant la rémunération des prestations de suivi des enregistreurs anémométriques : Avril à Juillet 2001
- Réception et dédouanement du matériel de mesure : comprenant les anémomètres et les mâts de mesures de 30 m et 50 m : Juin 2001

- Préparation des chantiers de mise en place des équipements, expédition des matériels lourds sur sites : Juillet-Septembre 2001
- Envoi des équipes dans les îles pour l'installation et la mise en service
- Fin d'installation et début d'enregistrement des données de vent :
 - Hao : 15 Octobre 2001
 - Apataki : 8 Novembre 2001
 - Takapoto : 16 Novembre 2001

III • RAPPEL DES SITES RETENUS

Les sites retenus sont ceux prévus dans le rapport préliminaire :



Le premier mât de mesure de 50 m a été installé sur le site de HAO, situé dans les Tuamotus de l'Est. Cette île est intéressante de part sa position très à l'Est par rapport aux autres sites retenus et permettant donc de bien compléter l'évaluation du gisement éolien sur cette partie de l'Archipel des Tuamotus.

Les zones à bon potentiels de développements économiques et donc aussi de développement en besoins énergétiques sont surtout situés dans les Tuamotus de l'Ouest et du Centre qui sont des atolls perlicoles. Toutefois, l'atoll de Hao de part son passé lié à celui des essais nucléaires, bénéficie de conditions fiscales particulières qui favorise sa croissance et ont attiré en 2001 l'implantation de plusieurs entreprises.

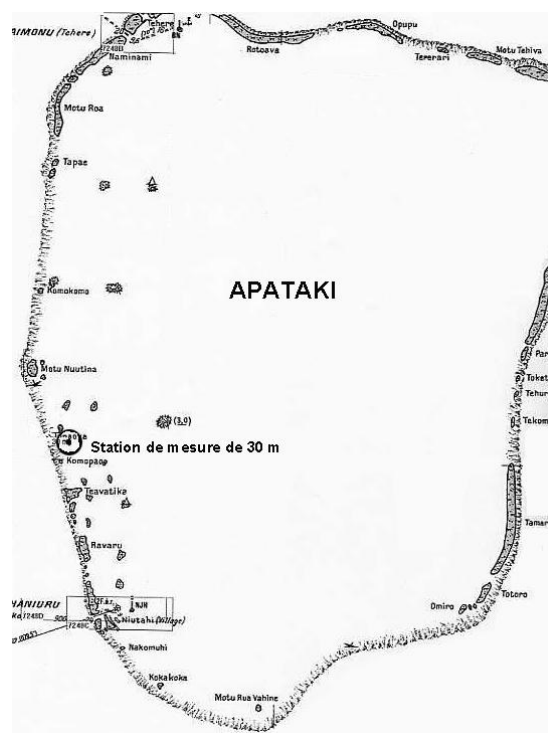
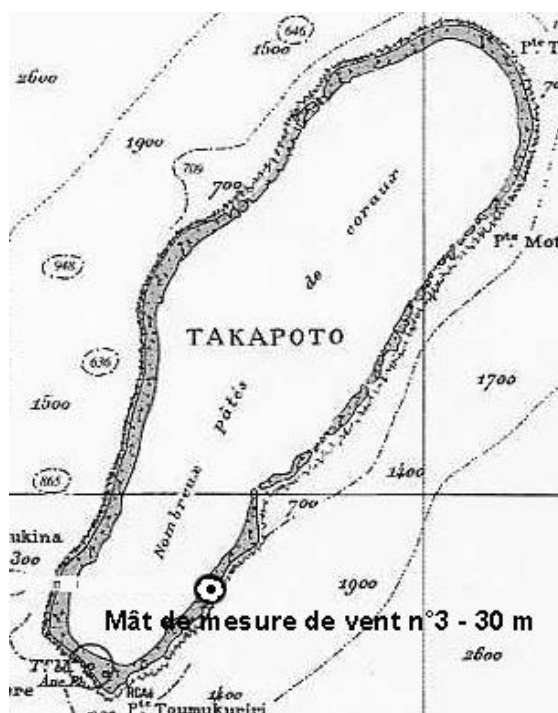
Les deux autres sites retenus sont situés sur l'Atoll d'Apataki et sur l'atoll de Takapoto.

Sur Apataki, le mât de 30 m est installé sur un motu situé sur la côte Ouest de l'Atoll, alors que le vent dominant est de secteur Est-ou Sud-Est. Cette configuration est aussi intéressante car elle permet de vérifier la validité de projet situés de cette manière, d'autant que l'effet de masque causé par le lagon devrait être faible du fait de la relative faiblesse des reliefs représentés par le sommet des cocotiers par rapport à la distance entre les deux côtés de cet atoll très large.

Sur le site de Takapoto, le troisième mât est situé à une hauteur de 30 m sur la côte Sud Est et donc sur la zone normalement la plus propice à la réception des alizés.

Les zones d'implantation sont dégagées (faible végétation). Globalement, les conditions d'implantation et la grande hauteur des mâts devraient permettre l'obtention de valeurs optimales et une bonne appréciation des gisements.

Par ailleurs, les îles retenues sont des îles où le projet photovoltaïque PHOTOM est implanté. Les mesures de vent pourront donc être facilement corrélées aux données d'ensoleillements qui sont enregistrés dans les boîtiers d'acquisition et de régulation de chaque installation PHOTOM, ce qui permettra aussi de vérifier la complémentarité entre ces deux sources d'énergies renouvelables.



IV • CONDITIONS DE DEROULEMENT DES CHANTIERS

Le délai de réalisation des stations a été plus important qu'escompté car les procédures de mises en place ont été beaucoup plus lourdes que prévues aussi bien en matériel, main d'œuvre que logistique.

Le procédé habituel prévu par le fournisseur et consistant à ancrer par forage des tiges de tenue des haubanages, s'avère impraticable dans les sites retenus car le sous sol est composé soit de sable sans cohésion, soit de blocs de « papa » extrêmement résistantes.



Aperçu du sol coralien composé de sable et de roches volcaniques dont le forage est impossible sans outillage spécialisé coûteux et difficilement mobilisables en Polynésie.

La fixation des haubans a donc nécessité la réalisation de massifs en bétons qui ont considérablement augmenté les temps de réalisation et grevé les budgets d'installation.

Images ci-après des génie-civils qui ont été nécessaires pour la mise en place des équipements. Ce génie-civil a nécessité aussi la mobilisation d'engins de manutention et d'excavation (« case », petit camion...)



Aperçus ci-après des images des mâts en phase de montage puis complètement érigés :



Le budget de la convention établi sur une base estimative très approximative car il s'agit bien d'une étude prospective mettant en œuvre des équipements de mesure peu habituels, s'est avéré largement dépassé.

Ce budget de mise en place avait été estimé à 4 500 Euros. Une revalorisation de ce budget selon les coûts réels, a donc été sollicitée.

ANALYSE DES MESURES REALISEES PAR SOLER ENERGIE

I ● DESCRIPTIF DES MESURES

I.1 ● STATIONS D'ACQUISITION

Les mesures sont réalisées à l'aide de matériel NRG Systems à deux hauteurs différentes sur des mâts de 30 et 50 mètres.

Nous avons donc disponible à l'aide de ces stations :

- Vitesses moyennes sur 60 minutes à 20m et 30m ou 50m
- Ecart type sur les vitesses (turbulence)
- Direction du vent moyenne sur 60 minutes à 30m ou 50m de hauteur

L'implantation des mâts de mesure sur les atolls concernés est précisée dans le chapitre précédent.

I.2 ● DUREE ET QUALITE DES MESURES

Les campagnes ont débuté en novembre 2001. Les problèmes logistiques liés à la dispersion des mâts et à leur isolement ont conduit à réaliser des relevés tous les 2 mois environ. Les « puces » de mesures sont rapatriées chez Soler Energie, qui les traduit sous forme de fichiers de mesures ensuite transmis à Vergnet SA. Les données mesurées couvrent la période du 25/10/2001 au 23/10/2002, soit 12 mois de mesures, ce qui correspond aux objectifs de cette étude (durée de mesure d'un an permettant de s'affranchir des variations saisonnières).

Le tableau en annexe présente les dates de relevés et les anomalies relevées. D'une manière synthétique, les défauts ou erreurs constatées ont été :

- Sur Hao :
- Problème sur l'anémomètre situé à 50 mètres de hauteur
 - Problèmes ponctuels sur la girouette
 - Pertes des données sur Janvier et Février 2002 suite à une mauvaise manipulation

Sur Takapoto : - Problème survenu en fin de campagne sur l'anémomètre à 20 mètres

- Pertes de données en août 2002

Sur Apataki : - Problèmes de qualité de la relève des « puces », à plusieurs reprises, ayant entraîné une baisse du taux de couverture des mesures.

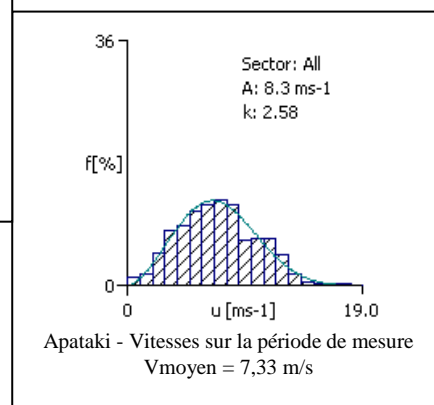
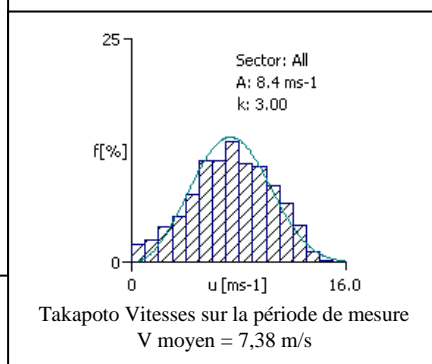
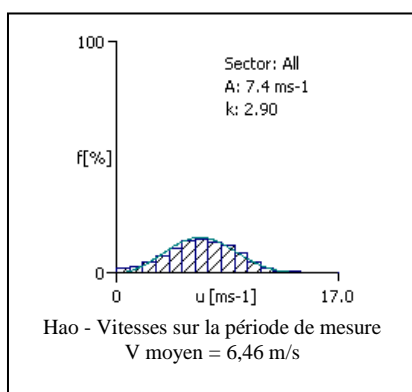
Sur toutes les stations, des erreurs de paramétrage ont parfois conduit à mesurer en nœuds marins plutôt que mètres par seconde, ce qui a pu être facilement corrigé pendant le traitement.

Compte tenu de ces remarques, le taux de complétion (temps de mesures réelles sur temps total) est de 71%, ce qui est très satisfaisant pour une campagne de mesure de ce type (3 sites dispersés et isolés). La quantité de mesures est très largement suffisante pour effectuer une analyse fine du gisement éolien et des corrélations pluriannuelles.

II • SYNTHÈSE DES MESURES SUR LA PÉRIODE

II.1 • VITESSES DE VENT

Le graphe ci-dessous présente pour les trois sites la répartition sur l'ensemble de la période du gisement éolien mesuré.

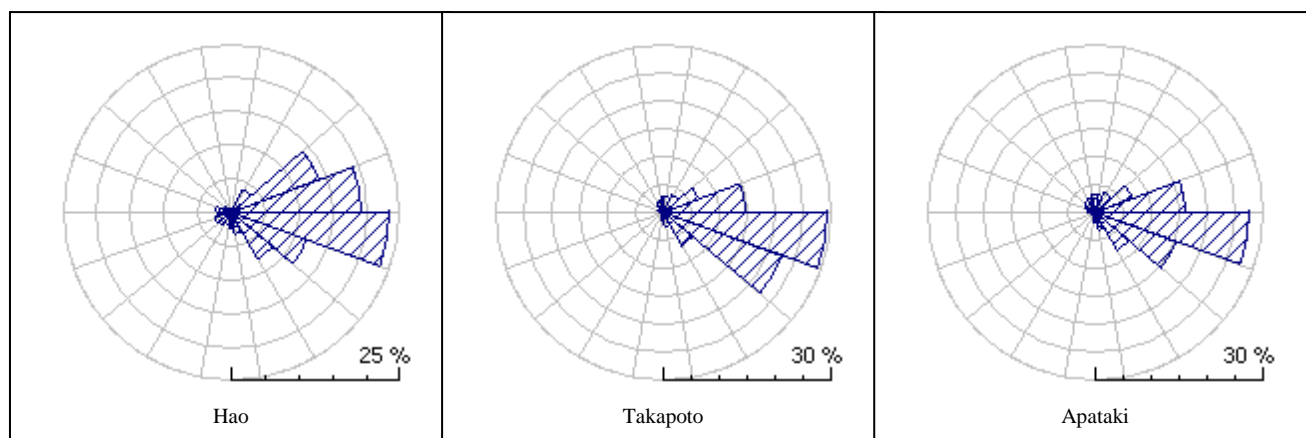


On remarque aisément que sur les trois sites **le gisement éolien mesuré à 30 mètres au dessus du sol est tout à fait exploitable pour des applications d'électrification autonome, voire de production d'électricité sur réseau.**

On retrouve également une bonne homogénéité entre Takapoto et Apataki, qui sont relativement proches, ainsi qu'une similitude forte de ces deux sites avec le site de Hao. Les analyses qui suivent permettront d'affiner ces constatations.

II.2 • DIRECTION DU VENT

Les roses des vents pour la période de mesure, sur les trois sites, sont présentées ci-dessous.



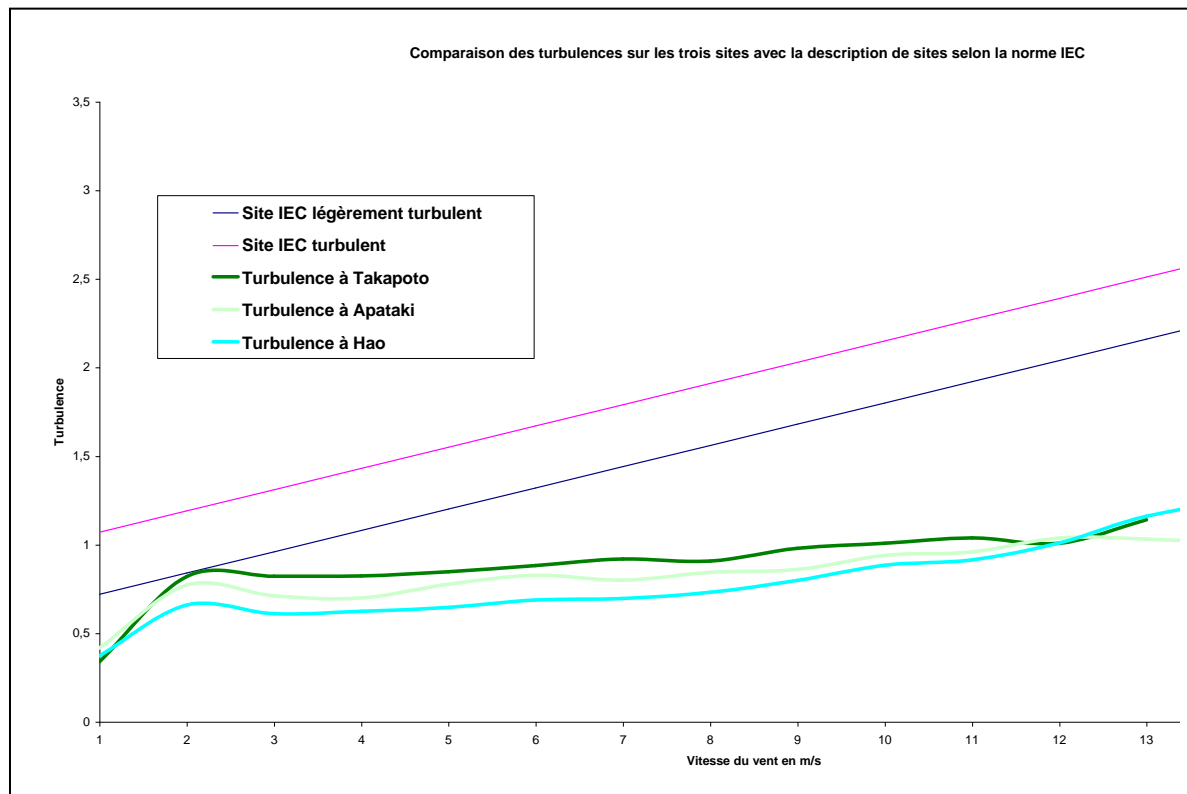
On remarque que sur la période le vent mesuré était presque systématiquement d'Est/Sud-Est, ce qui correspond à l'alizé dominant.

Les mêmes homogénéités et similitudes que pour la vitesse peuvent être constatées pour les directions de vent que celles exprimées pour les vitesses de vent au paragraphe précédent.

II.3 • TURBULENCE DU VENT

Les équipements de mesures mis en place permettent également de quantifier la turbulence du vent sur les sites. Le vent n'étant pas un flux strictement laminaire, à chaque moyenne mesurée est associée un écart type de la mesure, qui représente les variations autour de la moyenne (phénomènes de rafales). Cette notion de régularité permet de vérifier si le vent est très perturbé, et de le comparer aux standards élaborés pour les calculs de dimensionnement des aérogénérateurs.

Le graphe ci-dessous présente les niveaux de turbulence aux trois sites de mesure, comparés avec les standards de la norme IEC relative à la tenue des aérogénérateurs.



On remarque que **les niveaux de turbulence sont tout à fait acceptables pour la tenue dans le temps des aérogénérateurs (la turbulence à 7 m/s est de 0,7m/s, soit 10% alors que des valeurs proches de 15 à 20% sont tolérées)** . La turbulence est importante car elle influe :

- Sur le productible de l'éolienne (la turbulence fait diminuer le rendement des aérogénérateurs)
- Sur la durée de vie des aérogénérateurs (un site turbulent crée une fatigue prématurée des pales et de l'ensemble de la chaîne cinématique)
- Sur l'intégration éventuelle de la puissance éolienne dans un réseau diesel (la turbulence se traduit par des fluctuations de puissance éolienne, avec une forte sollicitation des organes de régulation des groupes)

Sur l'aspect turbulence, on peut conclure que le gisement éolien des Tuamotu est tout à fait propice à l'installation d'aérogénérateurs.

II.4 • GRADIENT VERTICAL DE LA VITESSE

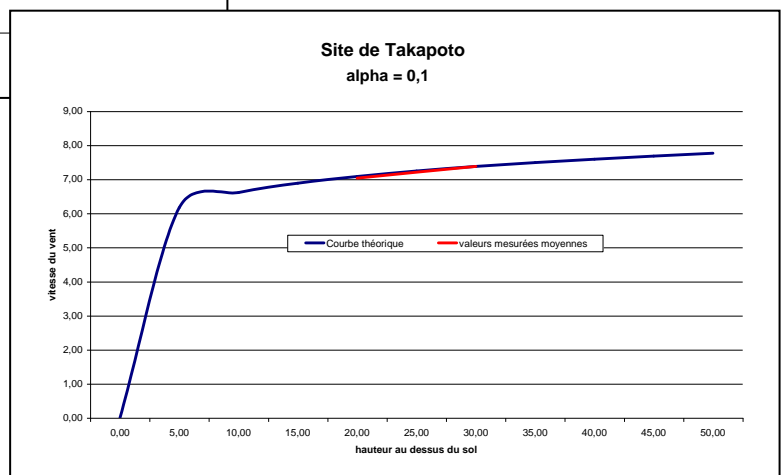
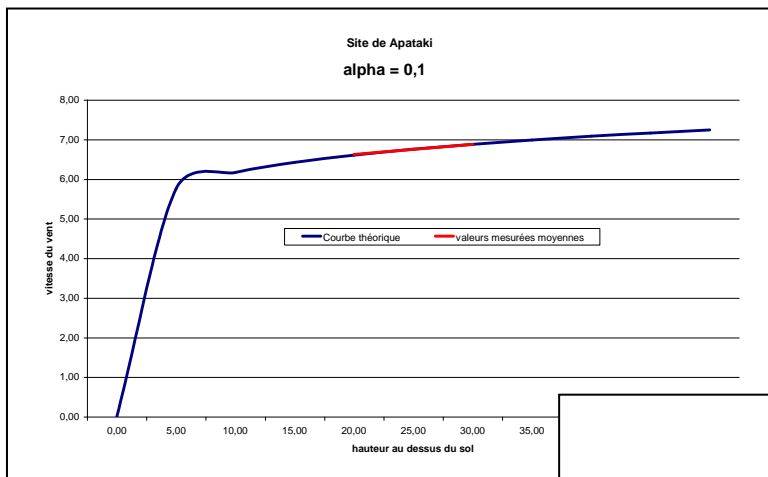
La végétation et les effets de relief ont une influence sur la vitesse du vent jusqu'à une hauteur d'environ 400 mètres au dessus du sol. Cette influence se traduit par un gradient (augmentation de la vitesse avec la hauteur) qui est propre à chaque site. Ce gradient est communément représenté par la fonction suivante :

$$V_{h1} = V_{h0} \times (h1/h0)^\alpha$$

Avec :

- V_{h1} vitesse du vent à la hauteur h1
- V_{h0} vitesse du vent à la hauteur h2
- $h1 \text{ \& } h0$ hauteurs de mesure et de calcul des vitesses de vent
- α Coefficient de cisaillement propre à chaque site

Dans notre cas, nous disposons de nombreuses mesures simultanées à 20 et 30 mètres sur les sites de Takapoto et Apataki (mais pas sur Hao compte tenu des problèmes de l'anémomètre à 50m). Ces mesures nous permettent de représenter le gradient vertical d'augmentation de la vitesse à l'emplacement des mâts de mesure. Ces mesures permettent d'estimer le coefficient de cisaillement du site, à partir duquel nous pourrions calculer la vitesse de vent pour les hauteurs non mesurées (en dessous de 20m ou au delà de 30 mètres). Cette courbe est présentée ci-dessous.



Il vient que le coefficient de cisaillement le plus proche des mesures est de $\alpha = 0,1$. Ce coefficient est cohérent avec les caractéristiques des sites que nous connaissons : totalement plats (atolls) et faible végétation (hors des cocoteraies). Pour la suite de l'étude nous retiendrons donc cette valeur sur l'ensemble de l'archipel.

II.5 • PREMIERE CONCLUSION

Les paragraphes précédents permettent d'ores et déjà de dresser les premières conclusions sur le gisement éolien de ces trois sites, mais aussi de l'archipel des Tuamotu :

- L'absence d'obstacles naturels permet une grande homogénéité du gisement éolien sur l'ensemble de l'archipel, tant sur le plan de la direction du vent que pour sa vitesse.
- La végétation rase (hors cocoteraie) et l'absence de relief font que le vent n'est pas perturbé et reste laminaire. Il en résulte un faible niveau de turbulences, et un gradient vertical peu élevé. Ces caractéristiques sont proches d'un régime de vent « Off shore » dont on sait qu'il permet de bonnes performances des aérogénérateurs.
- **Les vitesses de vent mesurées sont tout à fait encourageantes pour la valorisation de l'énergie éolienne. On considère en effet de manière globale :**
 - Que pour un vent supérieur à 6 m/s la solution de système autonome devient au moins aussi intéressante que l'électrification solaire
 - Que pour un vent supérieur à 7 m/s la production d'électricité éolienne sur réseau est très souvent rentable
- **Il est donc probable que des projets éoliens aient toute leur justification sur cet archipel. Cette conclusion sera affinée aux paragraphes suivants.** Il sera néanmoins nécessaire de résoudre les problèmes logistiques afin de permettre l'implantation et la maintenance d'aérogénérateurs dans ces zones dispersées et isolées.

III - CORRELATION DES MESURES AVEC LES STATIONS METEO FRANCE

La corrélation des mesures in situ avec une station dont les données sur le long terme sont disponibles est une étape incontournable de la caractérisation d'un site éolien. En effet elle permet de s'affranchir des effets météorologiques saisonniers ou annuels qui influent sur les mesures sur site.

Pour réaliser cette corrélation, nous avons choisi les stations Météo France de Hao, Takaroa et Rangiroa, comme pour la première partie de l'étude. Ces stations, sont les plus proches des sites de mesure. Elles sont situées en zones plates des aéroport, représentatives du gisement éolien local.

Nous avons acquis auprès de Météo France les données de vent horaires des mois de novembre 2001 à octobre 2002, ainsi que les statistiques de vent par direction sur la période 1965-1998, qui sont tout à fait représentative du gisement sur le long terme sur les trois stations (plus de 30 années de mesures).

I • CORRELATIONS SUR LA PERIODE DE MESURES

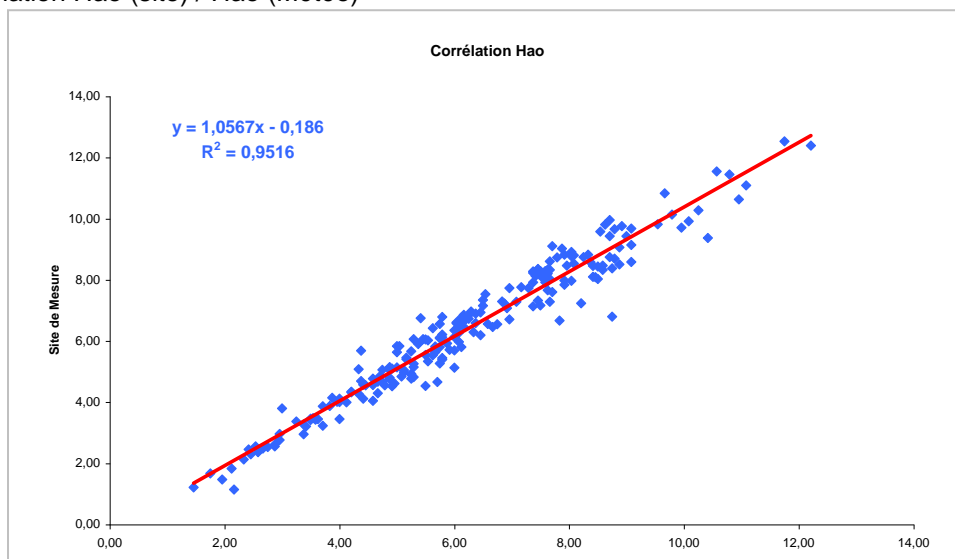
Les comparaisons des mesures synchrones de vent aux stations Météo France et sur les différents sites sur l'ensemble de la période concernée sont résumés dans les graphiques ci-dessous.

On notera que chaque site est corrélé avec la station Météo la plus proche, à savoir :

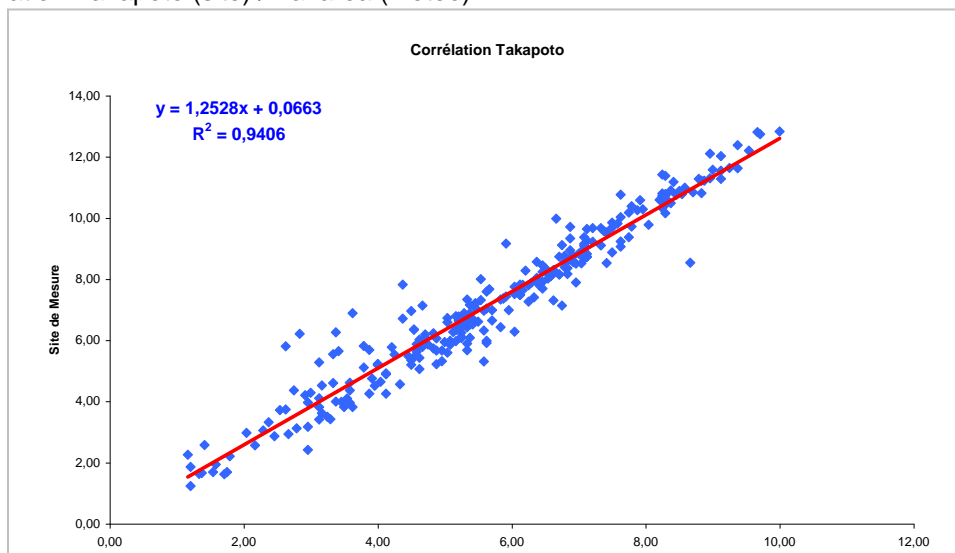
- Site de Hao corrélé avec la station Météo France de Hao
- Site de Tarapoto corrélé avec la station Météo France de Takaroa
- Site de Apataki corrélé avec la station Météo France de Rangiroa

Au préalable, une sélection des périodes de mesure disponibles et une vérification du synchronisme est réalisée afin d'éviter toute dérive de la corrélation.

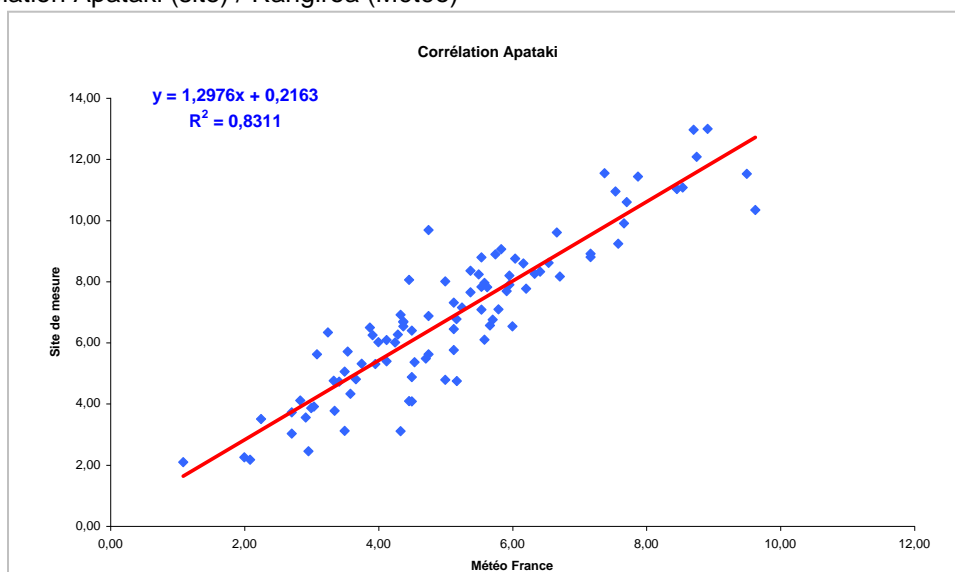
Corrélation Hao (site) / Hao (Météo)



Corrélation Takapoto (site) / Takaroa (Météo)



Corrélation Apataki (site) / Rangiroa (Météo)



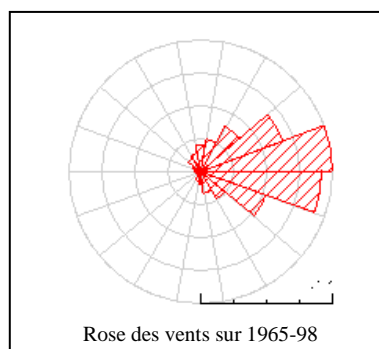
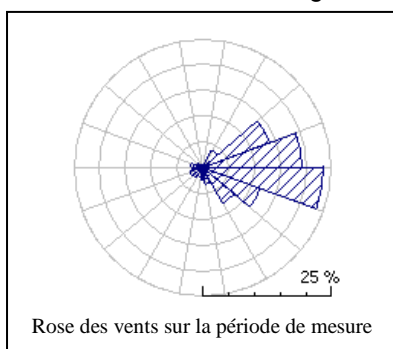
On remarque que les corrélations sont de très bonne qualité, avec un coefficient de régression de 0,88 au minimum sur Apataki (mais qui a le moins de mesures et la plus grande distance avec la station Météo France) et 0,95 pour Hao et Takapoto.

Nous pouvons donc considérer que la campagne de mesure sur site est suffisamment représentative et permet d'extrapoler les données mesurées sur le long terme.

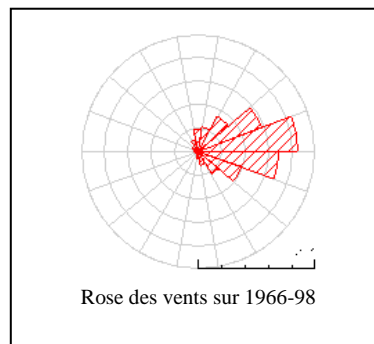
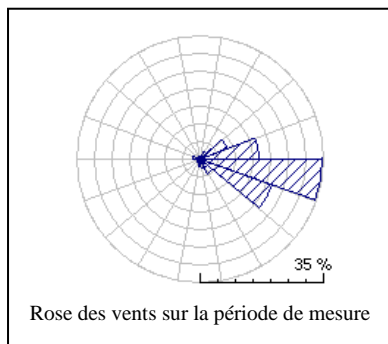
II • COMPARAISON DE LA PERIODE DE MESURE AVEC LES STATISTIQUES SUR LE LONG TERME

Les graphes ci-dessous présentent la comparaison des mesures de vent aux stations Météo France sur la période de mesure et sur le long terme.

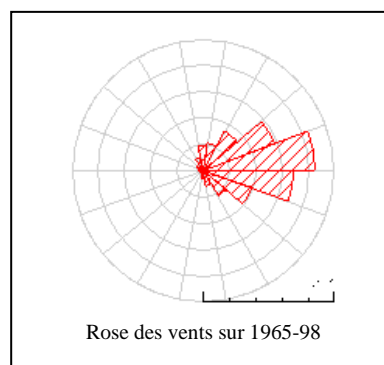
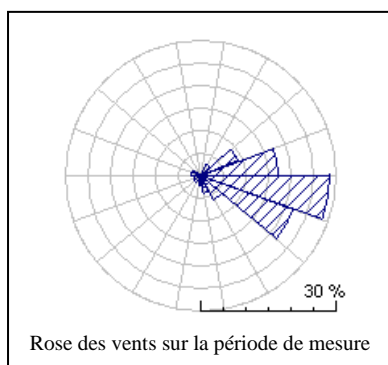
Hao



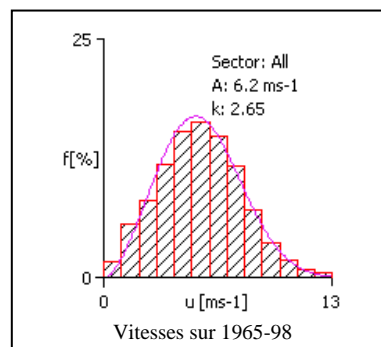
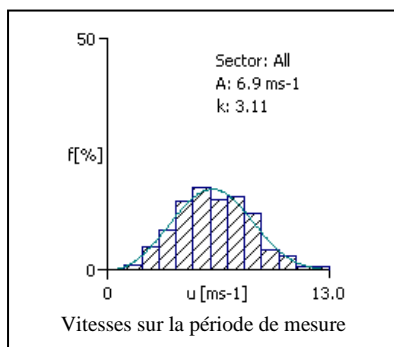
Takaroa



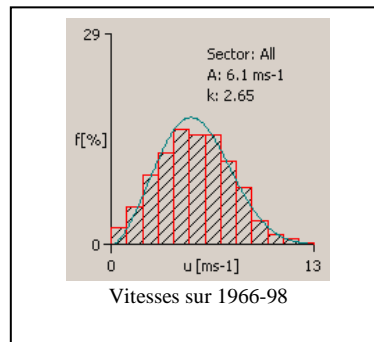
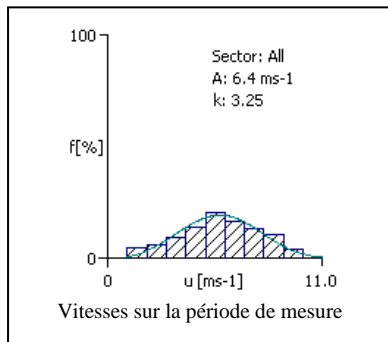
Rangiroa



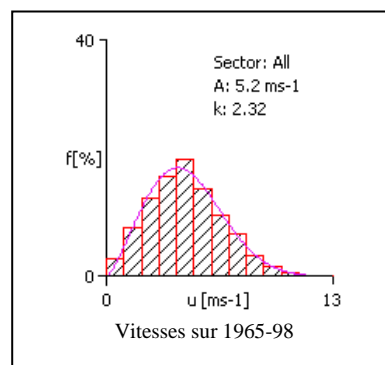
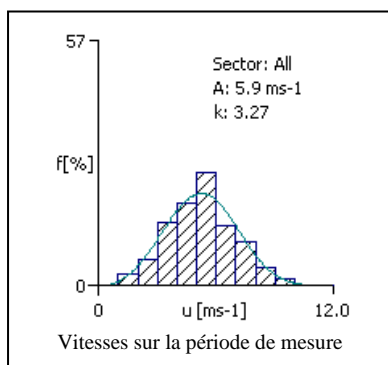
Hao



Takaroa



Rangiroa



La période de mesure (année 2002) est représentative du gisement éolien mesuré sur plus de 30 ans sur les stations Météo France. Cela est particulièrement vrai pour les directions du vent.

Les roses des vents sont quasi identiques sur la période de mesure et sur le long terme. Les corrélations obtenues au paragraphe précédent seront donc applicables sur les données long terme.

CALCUL DU GISEMENT EOLIEN SUR LES TUAMOTU

I • GISEMENT EOLIEN A 30 METRES AU DESSUS DU SOL

I.1 • SUR LES SITES DE MESURE

Les éléments explicités plus haut permettent de calculer le gisement éolien sur le long terme à 30 mètres de hauteur :

Hao

Vitesse moyenne du vent **6,6 m/s**

Coefficient k de Weibull **2,9**

Takapoto

Vitesse moyenne du vent **6,8 m/s**

Coefficient k de Weibull **3**

Apataki

Vitesse moyenne du vent **6,6 m/s**

Coefficient k de Weibull **2,8**

I.2 • REPARTITION DU GISEMENT SUR L'ARCHIPEL DES TUAMOTU

Les calculs fins montrent que le gisement est uniformément réparti sur l'ensemble de l'archipel. Ceci correspond aux caractéristiques physiques et climatologiques des Tuamotu :

- pas d'obstacles (montagnes) et peu de végétation au regard de la surface
- zone uniformément répartie parallèlement à la zone de Convergence du Pacifique (localisée sur l'axe de l'archipel de la Société), qui fait office « d'équateur climatique » et assure une bonne stabilité de l'alizé

Aussi, nous pouvons en conclure que, contrairement aux îles de la société, qui sont situées sur une zone de convergence (et donc peu ventées), **l'archipel des Tuamotu bénéficie d'un régime d'alizé stable, très peu perturbé et uniformément réparti.**

Les vitesses moyennes en zone dégagée seront de l'ordre de 6,5 m/s pour la zone proche de l'axe des îles de la Société (Rangiroa, Anaa, Tematangi) à 6,8 m/s pour les zones plus éloignées de cet axe (Takapoto, Raroia, Reao).

La carte de la page suivante présente l'atlas éolien de l'archipel, issu des interpolations élaborées à partir des mesures réalisées sur les trois atolls (Takapoto, Apataki et Hao).

II • CALCUL DE LA VITESSE AU DELA DE 30 METRES DE HAUTEUR

Nous avons vu au paragraphe II.II.4. que le gisement éolien sur ces sites augmente avec la hauteur selon la formule suivante :

$$V_{h1} = V_{h0} \times (h1/h0)^\alpha$$

Avec :	V_{h1}	vitesse du vent à la hauteur h1
	V_{h0}	vitesse du vent à la hauteur h2
	$h1 \text{ \& } h0$	hauteurs de mesure et de calcul des vitesses de vent
	α	Coefficient de cisaillement propre à chaque site, égal à 0,1 dans les trois cas étudiés

A ce titre, le calcul pour des hauteurs différentes, qui nécessiteraient cependant des adaptations importantes sur les aérogénérateurs de petite puissance, donne :

Vitesse moyenne à 20 mètres de hauteur : 6,3 à 6,5 m/s

Vitesse moyenne à 30 mètres de hauteur : 6,6 à 6,8 m/s

Vitesse moyenne à 40 mètres de hauteur : 6,8 à 7 m/s

Vitesse moyenne à 50 mètres de hauteur : 6,9 à 7,1 m/s

Au regard du gain en énergie, il ne semble pas opportun d'envisager des adaptations des aérogénérateurs de petite puissance, dont le surcoût risque d'être rédhibitoire. Ce point est évoqué plus loin.

V – CONCLUSION SUR LE GISEMENT EOLIEN

I ● INTERET DE LA SOLUTION EOLIENNE

Nous avons vu que les sites présentent de nombreux avantages pour un projet éolien :

- Le gisement éolien est conséquent, de l'ordre de 6,7 m/s dès 30 mètres au dessus du sol
- La répartition annuelle, abordée en tout début d'étude, est stable, ce qui permet de bénéficier toute l'année d'énergie éolienne disponible
- Le vent est laminaire et peu perturbé
- La répartition du gisement éolien, en zone dégagée (hors cocoteraie) est uniforme sur l'archipel, ce qui évite de recourir systématiquement à de nouvelles études pour des petits projets

II ● PRODUCTIBLE A 30 METRES

Les éléments des paragraphes précédents permettent de conclure suivants par type d'aérogénérateur (énergie disponible en sortie d'onduleur pour de la charge batterie) :

Type d'aérogénérateur	Hauteur	Vitesse du vent	Production brute	Production nette
GEV 6/5	30 m	6,6 m/s	34 kWh/j	22 kWh/j
GEV 7/10	30 m	6,6 m/s	65 kWh/j	42 kWh/j
GEV 10/15	30 m	6,6 m/s	98 kWh/j	64 kWh/j
GEV 15/60	30 m	6,6 m/s	280 kWh/j	175 kWh/j

Le productible a été calculé à partir des courbes de puissance des aérogénérateurs, auxquels il a été appliqué un facteur correctif de 0,65 pour tenir compte des pertes liées :

- à la turbulence (très faible)
- au taux de disponibilité des aérogénérateurs (interventions de maintenance, cyclones)
- des pertes électriques (chargeur, stockage, onduleur)
- à l'adéquation énergie éolienne disponible / besoin

Enfin, pour des aérogénérateurs couplés sur un réseau diesel où l'injection d'énergie est limitée par les conditions de fonctionnement des groupes, il conviendra de considérer des pertes de production différentes (de l'ordre de 0,9 au lieu de 0,65).

DIMENSIONNEMENT D'UNE SOLUTION TECHNIQUE

Au vu des résultats de l'étude du vent et des besoins énergétiques considérés, il est possible de définir en première approche des solutions techniques adaptées à la situation particulière des Tuamotu.

I.1 • TYPE DE BESOINS

Les éléments transmis par Soler Energie sur les besoins « standards » exprimés communément par les utilisateurs permettent de discerner trois options :

- **l'habitation isolée**, sans activité économique particulière, dont la consommation moyenne journalière est de **5 kWh/j**.
- **un site d'activité** artisanale, une pension ou une petite ferme perlière, qui a des besoins plus importants de l'ordre de **40 kWh/j**
- **un petit village**, de 20 à 30 habitations, dont la consommation moyenne est de **150 kWh/j**

I.2 • TYPE DE SYSTEME

Plusieurs systèmes faisant appel à l'éolien sont envisageables. On notera principalement :

- une éolienne de petite puissance en site isolé, pour une habitation
- un système éolien autonome, avec ou sans sécurisation par groupe diesel
- un système éolien/diesel, nécessitant le fonctionnement permanent du groupe diesel, et donc un minimum de charge sur le réseau
- un système éolien/solaire, avec ou sans sécurisation par groupe diesel

Le tableau ci-dessous présente brièvement les contraintes liées à chaque système.

systeme	Principales contraintes
éolien isolé	solution proche du solaire, en général plus coûteuse
éolien autonome	intérêt si le besoin en énergie devient important, permet le développement d'une activité
éolien/diesel	nécessite le fonctionnement permanent du groupe, en général pour une population > 500hab
éolien/solaire	investissement important, complémentarité de la ressource pas évidente, besoin de sécurisation diesel

Compte tenu des besoins standards exprimés, nous avons retenu pour la suite de l'étude :

- un aérogénérateur de 5 kW pour les habitations isolées. Ce dimensionnement sera à comparer aux équipement type « photom », communément installés sur les Tuamotu.
- un système éolien autonome avec sécurisation diesel pour les activités artisanales, touristiques ou perlicoles. Nous avons vu que certains aérogénérateurs permettent de couvrir très largement les besoins, y compris si ceux-ci augmentent dans le temps, ce qui est propre à toute activité économique.
- un système éolien autonome « renforcé » pour les petits villages, avec sécurisation diesel. En effet la consommation n'est pas suffisante pour envisager un système éolien/diesel. On notera que dans ce cadre, la sécurisation diesel devient indispensable.

Le système proposé est une alimentation autonome, c'est à dire l'installation d'aérogénérateurs qui chargent un parc de batteries. Dès qu'il y a du vent (supérieur à 4 m/s), l'aérogénérateur fournit du courant alternatif. Ce courant est redressé puis stocké. L'énergie est ensuite restituée au réseau général par l'intermédiaire d'un onduleur. Le dimensionnement de cet onduleur permet de subvenir aux besoins de pointe. La capacité de stockage des batteries permet de subvenir aux besoins en continu, même en cas d'absence de vent pendant plusieurs jours. Un groupe électrogène de secours est prévu pour pallier l'absence de vent durant des périodes plus longues (3 à 10 jours). Il faut noter que, tenant compte des caractéristiques du gisement éolien des Tuamotu, stable sur l'ensemble de l'année, le fonctionnement du groupe électrogène reste exceptionnel, et s'effectue à puissance nominale (pour recharger les batteries). Le détail du fonctionnement d'un système éolien autonome est présenté en annexe 1.

I.3 • MATERIEL

Le matériel complet comprend un aérogénérateur, un parc de batterie avec chargeur et onduleur. Le tableau suivant détaille la production d'électricité utile en sortie de système pour trois types d'aérogénérateurs (GEV 6/5, GEV 10/15 et GEV 7/10) et pour deux possibilités d'installation à 30 et 40 mètres de hauteur. La valeur du coefficient de Weibull est en moyenne de 2,9. La vitesse moyenne du vent est égale à 6,6 m/s à 30 mètres de hauteur et de 6.8 m/s à 40 mètres de hauteur. Le rendement total du système aérogénérateur – batterie - onduleur est estimé à 65%.

PRODUCTION D'ELECTRICITE DES AEROGENERATEURS VERGNET

Type d'aérogénérateur	Hauteur du mât haubané	Vitesse moyenne du vent	Production sortie aérogénérateur	Production sortie onduleur
GEV 6/5	20 m	6,3 m/s	25 kWh/j	16 kWh/j
GEV 6/5	30 m	6,6 m/s	34 kWh/j	22 kWh/j
GEV 7/10	30 m	6,6 m/s	65 kWh/j	42 kWh/j
GEV 7/10	40 m	6,8 m/s	80 kWh/j	52 kWh/j
GEV 10/15	30 m	6,6 m/s	105 kWh/j	70 kWh/j
GEV 10/15	40 m	6,8 m/s	140 kWh/j	90 kWh/j
GEV 15/60	30 m	6,6 m/s	280 kWh/j	175 kWh/j
GEV 15/60	40 m	6,8 m/s	320 kWh/j	207 kWh/j

Rappelons que les besoins estimés actuels sont pour les trois scénarii standards de 5, 40 et 150 kWh par jour et que l'augmentation prévisible de la demande ne devrait pas excéder 2% par an. Dans ces conditions, les besoins estimés à l'issue de la durée de vie des équipements sont de 8, 60 et 220 kWh/j.

1.3.1 • Choix de l'aérogénérateur

Habitation isolée

Le plus petit aérogénérateur de la gamme (5 kW) suffit amplement aux besoins. Nous pouvons même considérer qu'il est surdimensionnée et l'investissement risque d'être rédhitoire. Il n'est pas nécessaire pour cette machine d'utiliser un mât de forte hauteur.

Utilisation artisanale, petite hôtellerie ou ferme perlière

L'Aérogénérateur GEV 7/10 sur un mât haubané standard de 30 mètres couvre précisément les besoins actuels mais risque d'être rapidement sous-dimensionné dans le cas d'une évolution de la demande, à moyen et surtout long terme. Deux solutions paraissent adaptées aux besoins définis :

- aérogénérateur GEV 7/10 sur un mât haubané de 40 mètres,
- aérogénérateur GEV 10/15 sur un mât haubané de 30 mètres.

Le tableau suivant détaille les coûts des différents matériels en fonction de l'option choisie. Il s'agit uniquement du matériel au départ de France, hors installation, dont les frais sont sensiblement identiques.

**TABLEAU COMPARATIF DES COÛTS EN FONCTION DU TYPE
D'AÉROGÉNÉRATEUR CHOISI ET DE LA HAUTEUR D'INSTALLATION.**

	GEV 7/10 à 30 m	GEV 7/10 à 40 m	GEV 10/15 à 30 m
Aérogénérateur	24 500	24 500	27 500
Mât haubané	13 800	18 400	13 800
Prix total	38 300	42 900	41 300

Il apparaît que le prix « matériel » d'une GEV 7/10 sur un mât haubané de 40 mètres est plus important que celui d'une GEV 10/15 sur un mât haubané standard de 30 mètres. Pour un investissement moindre, la GEV 10/15 permet de disposer d'une puissance légèrement supérieure et de satisfaire la totalité des besoins estimés au cours des vingt prochaines années.

De plus, si l'on étudie les variations mensuelles de la vitesse du vent sur les différentes stations de mesure Météo France (10 à 25 années de mesures), il apparaît qu'au cours des mois les moins ventés (novembre à avril), la vitesse moyenne à 10 mètres de hauteur ne descend jamais en dessous de 4,4 m/s, même dans la partie occidentale des Tuamotu où les alizés sont plus faibles.

Le calcul de la vitesse minimale à 30 mètres de hauteur donne 5,5 m/s. A cette vitesse, pour un coefficient k de Weibull de 2,9 la production énergétique nette d'un aérogénérateur GEV 10/15 est de 40 kWh/jour et couvre exactement les besoins actuels en électricité.

Le système éolien est donc autonome même au cours des mois les moins ventés, surtout si l'on tient compte du fait que la batterie d'accumulateurs autorise une autonomie de deux jours et demi. La sécurisation diesel restera donc effectivement exceptionnelle.

Village

Le tableau présenté plus haut indique que seul l'aérogénérateur de 60 kW peut subvenir aux besoins. Afin de limiter au maximum le fonctionnement du groupe de secours, on privilégiera un mât de 40 mètres de hauteur. Une attention particulière devra être donnée à l'évolution de la consommation, puisque l'augmentation des besoins sur 20 ans risque d'engendrer une utilisation plus importante du groupe.

1.3.2 • Equipements électriques et stockage de l'énergie

Ces équipements annexes comprennent :

Pour une habitation isolée

- 1 coffret de charge batterie 48 volts en courant continu – 125 ampères,
- 1 onduleur 48 Vcc – 220 Vac, 50 Hz.

Les équipements en 48Vcc (éclairage, froid) sont à prévoir en complément.

Pour une application artisanale, petite hotellerie ou ferme perlière

- 1 coffret de charge batterie 120 volts en courant continu – 125 ampères,
- 1 onduleur 120 Vcc – 220 Vac, 50 Hz.

Des équipements 220 Vac pourront être utilisés, à condition qu'ils soient de qualité pour ce qui concerne leur consommation (LBC etc...)

Pour un village

- 1 variateur de vitesse 300 volts en courant continu – 250 ampères,

La distribution dans le village sera à étudier sous la forme d'un mini réseau Basse Tension.

L'ensemble du câblage, les protections et le comptage de l'énergie sont prévus, ils sont dimensionnés pour fournir la puissance de pointe.

Le stockage est effectué par une série de batteries à plaques positives tubulaires. Le dimensionnement de la batterie permet un stockage de l'énergie correspondant à environ deux jours et demi de consommation au rythme des besoins actuels et 2 jours de stockage à l'horizon 2015.

Le groupe de secours est dimensionné pour alimenter l'ensemble des besoins en pointe (gamme 6-15 kVA). Son fonctionnement s'effectue systématiquement à puissance nominale puisque la capacité du chargeur de batterie est supérieure à la puissance du groupe.

EVALUATION FINANCIERE DES SOLUTIONS

I ● CHOIX DU SYSTEME D'ANCRAGE

I.1 ● OPTION 1 : EMBASE DU MAT PLUS ANCRAGES POIDS POUR LES HAUBANS.

Le volume de béton à mettre en œuvre pour cette option est d'environ 17 m³. Le coût de mise en place du béton armé sur place est de 90.000 CFP HT par m³, soit 1.557.000 CFP pour le volume prévu, soit **12 800 Eur** pour le génie civil, par site d'implantation. Cette solution est très onéreuse.

I.2 ● OPTION 2 : EMBASE DU MAT PLUS ANCRAGES SCelles POUR LES HAUBANS.

Le sous-sol des atolls étant formé de calcaires coralliens, il est possible de fixer l'éolienne par des ancrages scellés. Le volume de béton à mettre en œuvre par site est d'environ 3 m³ pour l'embase et les ancrages. Le coût de mise en place du béton est alors de 270.000 CFP, soit 2 250 Eur.

- **Cas n°1** : utilisation d'une carotteuse locale. Le coût de la mise à disposition sur place de l'atelier de carottage est de 600.000 CFP par site, compte tenu de l'immobilisation du matériel et du technicien pendant les trajets. Cela représente un total de 870.000 CFP avec la mise en place du béton, soit **7 300 Eur** pour les travaux de génie civil pour chaque site d'implantation.
- **Cas n°2** : une solution plus économique consisterait à faire l'acquisition d'un marteau perforateur portatif à moteur thermique et des accessoires de forage. L'ensemble, totalement autonome, permet de réaliser des forages jusqu'à 3 mètres de profondeur dans les roches calcaires. Le coût de l'investissement serait alors reparti sur les divers sites d'implantation, ce qui diminuerait d'autant les coûts du génie civil. Les prix hors taxes des divers outils sont les suivants :

▪ marteau perforateur Pionjär 120 :	3 000 Eur
▪ fleurets et aléreur :	1 500 Eur
Total pour le matériel de forage :	4 500 Eur

Si l'on raisonne sur cinq installations, le coût d'amortissement du matériel est approximativement de 920 Eur par site. Le coût total des travaux de génie civil sur place avec la mise en place du béton et les scellements s'élève à environ **4 000 Eur** par site d'implantation. Cette solution n'est cependant possible que pour les aérogénérateurs de 5 et 15 kW.

II ● ESTIMATION DU BUDGET DE L'OPERATION

Les prix matériel s'entendent hors taxes au départ d'Orléans. Ces estimations sont non contractuelles. Sur demande, un devis détaillé de la fourniture et des prestations pourra être transmis par VERGNET SA. Le prix total comprend la fourniture, le transport sur site, l'installation et la mise en service d'un aérogénérateur sur mât haubané, un parc de batteries, un chargeur de batteries et un onduleur.

	GEV 6/5	GEV 10/15	GEV 15/60
Matériel éolien et électrique CIF PPT	38 000 €	59 000 €	145 000 €
Batteries et onduleur	10 000 €	20 000 €	80 000 €
Génie civil	4 000 €	4 000 €	12 000 €
Installation / Raccordement	6 000 €	6 000 €	17 000 €
Groupe électrogène	- €	11 000 €	14 000 €
TOTAL	58 000 €	100 000 €	268 000 €

III • COMPARAISON AVEC UNE ELECTRIFICATION SOLAIRE

Pour satisfaire les besoins évoqués, un dimensionnement sommaire d'installations photovoltaïques a été réalisé pour chaque solution « standard ». Dans le cas d'un site d'activité économique (consommation de 40 kWh/j), deux solutions sont proposées car elles semblent techniquement et économiquement faisables.

Nous retrouvons donc :

- pour une habitation isolée, consommant 5 kWh/j, un kit de 1,44 kWc autonome
- pour un site d'activité économique, consommant 40 kWh/j, deux options : 1/ Solaire autonome de 13,5 kWc ; 2/ Solaire/diesel permettant de couvrir 50% des besoins par le photovoltaïque
- pour un village, consommant 150 kWh/j, une centrale hybride solaire/diesel, où le photovoltaïque couvre 50% des besoins.

L'investissement pour ces différentes solutions a été évalué et est présenté dans le tableau ci-dessous. Ces résultats sont à comparer aux solutions éoliennes du paragraphe précédent.

	5 kWh/j	40 kWh/j		150 kWh/j
	1,44 kWc	5,85 kWc + diesel	13,5 kWc	21,87 kWc + diesel
Panneaux, structures	14 000 €	51 000 €	119 000 €	193 000 €
Batteries, onduleur et armoire électrique	21 000 €	41 000 €	43 000 €	54 000 €
Installation et raccordement	3 000 €	10 000 €	13 000 €	22 000 €
Groupe électrogène	0 €	11 000 €	0 €	14 000 €
Total	38 000 €	113 000 €	175 000 €	283 000 €

On remarque tout d'abord que pour des besoins de type « habitation isolée », la solution solaire est beaucoup plus avantageuse en termes d'investissement. On retrouve là la difficulté d'adapter l'éolien à de faibles besoins.

Pour des besoins de 40 kWh/j, la solution éolienne semble beaucoup plus performante, d'autant qu'en termes d'exploitation, elle est à rapprocher d'un système de 13,5 kWc, qui coûte presque deux fois plus cher, et dont le dimensionnement ne laisse que peu de marge à une augmentation de la consommation, qui est en général la tendance naturelle d'une activité économique.

Pour ce qui concerne les systèmes villageois, les montants d'investissement sont similaires (5% de différence en estimation grossière). L'avantage sera probablement donné au système éolien, car celui-ci permet de subvenir à la quasi-intégralité des besoins, alors que dans le cas du système solaire/diesel, 50% de la production sera fournie par le groupe diesel.

COMPARAISON ECONOMIQUE DES DIFFERENTS SYSTEMES

Au-delà de la simple estimation des montants d'investissement, l'analyse de la pertinence économique de chaque solution technique est également à envisager sur le long terme. En effet, si les énergies renouvelables se caractérisent par un investissement élevé et des coûts d'exploitation faibles, la mise en place de solutions hybrides peut modifier fondamentalement l'intérêt économique d'un des systèmes proposés.

Pour faire cette analyse, nous avons dans un premier temps estimé les coûts récurrents de maintenance et d'exploitation de chaque système. Ces coûts ont ensuite été actualisés sur 15 ans afin de comparer chaque solution sur le simple critère économique.

I ● EVALUATION DES FRAIS RECURRENENTS

I.1 ● ENTRETIEN ET MAINTENANCE DES EQUIPEMENTS

Les éléments de coût ont été estimés principalement pour un système de 40 kWh/j.

Dans le cas d'un système éolien, il est recommandé de réaliser deux visites annuelles par un technicien venant de Papeete, et des visites régulières d'une demi-journée par mois environ de la part d'un agent. Les vérifications d'usage sur le fonctionnement de la partie électrique, le groupe électrogène et les batteries sont réalisées dans le cadre de ces visites. Il vient que les frais récurrents annuels sur le système éolien sont de :

Main d'œuvre et déplacements :	1600 €
Consommables :	1000 €
Total annuel éolien	2600 €

Dans le cas d'un système solaire ou hybride solaire/diesel, il est prévu une visite de maintenance annuelle et des visites régulières d'agents locaux basés sur l'atoll où à proximité.

Main d'œuvre et déplacements : 1000 €

Consommables : 300 €

Total annuel solaire 1300 €

Les autres cas d'études (habitation isolée et village) sont estimés de la manière suivante :

- 5 systèmes isolés correspondent à l'équivalent d'un site d'activité économique (compte tenu de la dispersion)
- 1 système villageois correspond à l'équivalent de deux systèmes produisant 40 kWh/j.

I.2 • CONSOMMATION DE CARBURANT

Deux systèmes hybrides solaire/diesel et deux systèmes autonomes éolien font appel pour une part à de la production diesel. Il convient donc d'évaluer le coût en combustible de cette part de l'exploitation.

Dans le cas des systèmes hybrides solaire/diesel, le dimensionnement implique que environ la moitié de la production est issue du groupe, soit 20 kWh/j et 75 kWh/j.

L'hypothèse est prise que le fonctionnement s'effectue à puissance nominale et qu'une part de cette production sert à recharger les batteries, ce qui permet un fonctionnement optimal du groupe, et une consommation spécifique de 0,4 litre de gasoil par kWh produit. On considère également que le carburant est au prix de 76 Fcfp (64,7 c€) sur les sites concernés, ce qui correspond au prix à la pompe dans les Tuamotu.

Le coût du carburant est donc :

- pour un système solaire/diesel de 40 kWh/j : 1 890 €/an

- pour un système solaire/diesel de 150 kWh/j : 7 100 €/an

Dans le cas des systèmes éoliens, nous avons vu que la répartition du vent sur l'année est relativement stable, avec pour les mois les moins ventés un gisement environ 15% en deçà de la moyenne, ce qui conduit à une baisse de production éolienne de 25% par rapport à la moyenne. Cette baisse de production conduit à des productions nettes de 45 kWh/j et 122 kWh/j, comparées aux besoins estimés à 40 et 150 kWh/j. Les installations éoliennes permettent alors de subvenir au strict minimum des besoins. Des phénomènes plus marqués, à l'échelle d'une dizaine de jours, peuvent également accentuer la baisse de production, ce qui explique la mise en place de groupes électrogènes en « secours » lorsque le vent est très faible pendant plus de trois jours.

Dans les deux cas, l'évaluation de la part de consommation qui sera apportée par le groupe donne :

- 10% de production diesel pour le système dimensionné pour un consommateur de 40 kWh/j
- 20% de production diesel pour le système dimensionné pour un village qui consomme 150 kWh/j

Il vient que, pour les hypothèses identiques à celles formulées précédemment, le coût annuel en carburant est de :

- pour un système éolien de 40 kWh/j : 380 €/an
- pour un système éolien de 150 kWh/j : 2 830 €/an

I.3 • RENOUELEMENT DES BATTERIES, MAINTENANCE LOURDE DU GROUPE

Les calculs sont actualisés sur 15 ans, ce qui correspond à une durée de vie minimum des équipements « renouvelables » (Panneaux solaires et éoliennes). Aussi, nous intégrerons dans les charges d'exploitation un renouvellement du parc de batteries en milieu de vie de l'installation, soit la 8^{ème} année. Ce renouvellement est réputé réalisé au prix actuel des batteries.

Par ailleurs, des visites de maintenance spécifiques sont à prévoir pour les groupes dont le fonctionnement dépasse 5 000 heures. La durée de vie d'un groupe est d'environ 25 000 heures, et l'ensemble des prestations de maintenance lourde, échelonnées toutes les 5 000 heures, équivaut au prix d'acquisition à neuf, soit ¼ du prix d'acquisition pour chaque visite.

La durée entre les visites et donc le coût annuel dépend des solutions dimensionnées :

- pour un système solaire/diesel de 40 kWh/j : 5 h de marche par jour 2 750 € tous les 3 ans
- pour un système solaire/diesel de 150 kWh/j : 8 h de marche par jour 3 500 € tous les 2 ans
- pour un système éolien de 40 kWh/j : moins de 5 000 h sur 15ans pas de coût sur 15 an
- pour un système éolien de 150 kWh/j : 3 h de marche par jour 3 500 € tous les 5 ans

II • COMPARAISON ECONOMIQUE DES SOLUTIONS PROPOSEES

- Les éléments de coût d'investissement et de frais d'exploitation, d'entretien et de maintenance sont repris dans le tableau ci-dessous.

	Investissement	Coût annuel	Coût sur 15 ans	Coût au kWh
éolien GEV 6/5	58 000 €	1 420 €	79 295 €	2,90 €
1,44 kWc	38 000 €	1 160 €	55 395 €	2,02 €
GEV 10/15 et groupe de secours	100 000 €	4 313 €	164 700 €	0,75 €
Solaire 13,5 kWc	175 000 €	3 099 €	221 490 €	1,01 €
Solaire - diesel	113 000 €	5 906 €	201 595 €	0,92 €
GEV15/60 et groupe de secours	268 000 €	17 000 €	523 000 €	0,64 €
Solaire 21,8 kWc - diesel	283 000 €	13 699 €	488 488 €	0,59 €

Les conclusions en termes d'intérêt économique pour chaque type d'application sont donc :

- que pour une habitation isolée, consommant 5 kWh/j environ, le système Photovoltaïque reste assez largement plus intéressant et adapté au contexte des Tuamotu
- que pour une application liée à une activité économique (artisanale, petite hotellerie ou ferme perlière), dont la consommation est d'environ 40 kWh/j, la solution la plus intéressante reste une installation éolienne autonome

- que pour un village, dont la consommation est d'environ 150 kWh/j, la solution éolienne et la solution solaire/diesel sont proches, et que l'intérêt de l'une ou l'autre des solutions sera déterminé par l'identification précise des besoins et des coûts d'investissement. Pour cette application, la solution éolienne est principalement pénalisée par le coût important de renouvellement des batteries (300V) et que cet élément pourra être pris en compte avec plus de précision dans une étude de cas.

On notera que, dans le cadre de la sommation des coûts de chaque solution sur 15 ans, il est fait abstraction :

- de l'évolution des prix du carburant sur 15 ans, qui pénaliserait dans ce cas les solutions consommatrices de carburant
- de l'évolution des coûts de main d'œuvre au cours des années, qui pénaliserait principalement les solutions éoliennes, pour lesquelles la maintenance est plus élevée.
- du « coût de l'argent », c'est-à-dire des taux d'intérêts, qui pénaliserait les solutions dont l'investissement est supérieur au départ.

CONCLUSION

L'étude préliminaire du gisement éolien de l'archipel des Tuamotu a permis de mettre en évidence que la mise en place d'un projet d'éolienne autonome pour l'alimentation en électricité des installations privées est tout à fait réalisable eu égard aux besoins actuels. Le gisement éolien est en effet évalué à 6,6 m/s, ce qui est suffisant pour faire de la solution éolienne, une alternative techniquement adaptée à des projets d'électrification isolée.

L'application la plus propice au stade actuel semble être les sites isolés de forte consommation, correspondant à des activités économiques (artisanat, petite hôtellerie, ferme perlière). Pour des besoins estimés à 40 kWh/j, la solution VERGNET de type RESEOL est techniquement adaptée et économiquement plus intéressante que la solution solaire.

Avec une énergie moyenne disponible de 65 kWh par jour, le matériel proposé, l'aérogénérateur GEV 10/15 monté sur un mât haubané de 30 mètres de hauteur, permet de satisfaire les besoins actuels de 40 kWh/jour ainsi que les besoins estimés à long terme (60 kWh/jour en 2020) et ainsi, de donner une place à un développement économique local (petit artisanat, activité perlière). Associé à un parc de batteries de près de trois jours de réserve, il présente une parfaite autonomie et permet de répondre à la demande en électricité même au cours des mois les moins ventés.

Par ailleurs, la GEV 10/15, comme tous les aérogénérateurs de la gamme Vergnet, est conçue pour une installation et une mise en service sans logistique lourde (transport en caisse, installation au niveau du sol, levage du support avec un tirfor). Grâce à son support haubané, cette machine est compatible avec les régimes climatiques difficiles, particulièrement dans les régions cycloniques. En cas d'alerte, une personne suffit pour coucher un aérogénérateur et le fixer au sol en 30 minutes.

De plus, au même titre que l'énergie solaire, l'énergie éolienne totalement renouvelable, permettra d'accroître l'indépendance énergétique des localités situées sur les atolls isolés.

Enfin, sur le plan écologique, cette solution permettra de limiter les problèmes de pollution sur les atolls. Par rapport à une alimentation tributaire à 100% d'un groupe électrogène diesel, le rejet dans l'atmosphère de plus de 10 tonnes de CO₂ par an sera ainsi évité. Par ailleurs, l'utilisation du groupe électrogène devenant très occasionnelle, voire exceptionnelle, la solution éolienne diminuera considérablement les risques de pollution du lagon et de la lentille d'eau douce superficielle servant de réservoir d'eau potable, ces risques étant essentiellement liés à l'infiltration des écoulements de gas-oil et d'huiles de vidange.

ANNEXES

Annexe 1 : fiche descriptive d'un système éolien autonome VERGNET

Annexe 2 : fiches techniques des aérogénérateurs GEV 6/5 ; GEV 10/15 et GEV15/60

Annexe 1.

Fiche descriptive d'un système éolien autonome VERGNET

Annexe 2.

Fiche technique de l'aérogénérateur GEV 10/15