

Modélisation De La Variabilité Climatique Saisonnière Et Evaluation Du Potentiel Des Energies Renouvelables Dans La Région Vatovavy (Madagascar)

[Study Of Seasonal Climate Variability And The Potential Contribution Of Renewable Energies: Modeling Applied To The Fitovinany Region (Madagascar)]

El dara Basile RAMANITRARIVO¹, Mamitiana RAMAMONJISOA², Hobiniaina RAKOTONDRAFARA³, Jean Luc RASOANAIVO⁴, Achille RAVONINJATOVO⁵, Lala ANDRIANAIVO⁶

¹Ecole Doctorale en Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation

E-mail : ramanitrarivoeldarabasile@gmail.com

²Centre National de Recherches Industrielle et Technologique

Antananarivo, Madagascar

E-mail : mtr_mamitiana@yahoo.fr

³Centre National de Recherches Industrielle et Technologique

Antananarivo, Madagascar

E-mail : hobynyn@gmail.com

⁴Centre National de Recherches Industrielle et Technologique

Ecole Doctorale en Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation

Antananarivo, Madagascar

E-mail : jeanlucnj@gmail.com

⁵Centre National de Recherches Industrielle et Technologique

Ecole Doctorale en Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation

Antananarivo, Madagascar

E-mail : achillegc@yahoo.fr

⁶Ecole supérieure Polytechnique Antananarivo

Ecole Doctorale en Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation

E-mail : andrianaivo.andri@gmail.com

Auteur Correspondant : El dara Basile RAMANITRARIVO, ramanitrarivoeldarabasile@gmail.com



Résumé : L'étude vise à analyser la variabilité saisonnière du climat et son impact sur le potentiel des énergies renouvelables (solaire, éolien, hydraulique) dans la région Vatovavy, Madagascar. À partir des données climatiques historiques (précipitations, irradiation solaire, vent), la recherche modélise la production énergétique attendue pour chaque saison et évalue la fiabilité et la continuité de l'approvisionnement.

L'étude montre que l'analyse de la variabilité climatique saisonnière dans la région de Vatovavy met en évidence une prédominance de la ressource solaire parmi les énergies renouvelables disponibles. Le rayonnement moyen annuel de 5,22 kWh/m²/j, associé à des températures favorables tout au long de l'année, confère à l'énergie photovoltaïque un potentiel élevé et relativement stable. Les précipitations annuelles atteignant 1487 mm suggèrent également un potentiel intéressant pour la petite hydroélectricité, particulièrement durant la saison humide. En revanche, les faibles vitesses moyennes du vent observées limitent considérablement les perspectives de développement de l'énergie éolienne.

Les résultats obtenus indiquent ainsi que les stratégies énergétiques régionales devraient privilégier les systèmes photovoltaïques, éventuellement couplés à des installations hydroélectriques de petite puissance afin d'assurer une meilleure complémentarité saisonnière des ressources énergétiques.

En bref, cette étude contribue à une meilleure compréhension des interactions entre le climat régional et les ressources énergétiques renouvelables. Les résultats obtenus constituent une base scientifique utile pour la planification énergétique, l'adaptation aux changements climatiques et la promotion d'un développement durable dans la région de Vatovavy.

Mots clés : variabilité climatique saisonnière, modélisation climatique, énergie solaire, énergie éolienne, énergie hydroélectrique, ressources renouvelables, développement durable, Madagascar.

Abstract: The study aims to analyze seasonal climate variability and its impact on the potential for renewable energy (solar, wind, and hydroelectric) in the Vatovavy region of Madagascar. Using historical climate data (precipitation, solar radiation, and wind), the research models expected energy production for each season and assesses the reliability and continuity of the energy supply.

The study shows that an analysis of seasonal climate variability in the Vatovavy region reveals that solar energy is the dominant renewable energy source available. The average annual solar radiation of 5.22 kWh/m²/day, combined with favorable temperatures throughout the year, gives photovoltaic energy high and relatively stable potential. Annual precipitation reaching 1,487 mm also suggests significant potential for small-scale hydropower, particularly during the wet season. In contrast, the low average wind speeds observed considerably limit the prospects for wind energy development.

The results thus indicate that regional energy strategies should prioritize photovoltaic systems, possibly combined with small-scale hydroelectric facilities, in order to ensure greater seasonal complementarity among energy resources.

In short, this study contributes to a better understanding of the interactions between regional climate and renewable energy resources. The findings provide a useful scientific basis for energy planning, climate change adaptation, and the promotion of sustainable development in the Vatovavy region.

Keywords: seasonal climate variability, climate modeling, solar energy, wind energy, hydroelectric power, renewable resources, sustainable development, Madagascar.

1 Introduction

L'énergie joue un rôle essentiel dans le développement économique et social. Face aux défis du changement climatique et à la dépendance aux combustibles fossiles [1], les énergies renouvelables apparaissent comme une solution durable pour répondre aux besoins énergétiques tout en préservant l'environnement.

Madagascar dispose d'importantes ressources renouvelables, notamment solaires, hydrauliques et éoliennes, dont l'exploitation dépend fortement des conditions climatiques [3]. Dans la région de Vatovavy, caractérisée par un climat humide et une forte pluviométrie, l'étude de la variabilité climatique est nécessaire pour mieux évaluer le potentiel de ces ressources.

Cette recherche vise ainsi à analyser les paramètres climatiques de la région de Vatovavy et à évaluer leur influence sur le développement des énergies renouvelables afin de contribuer à une planification énergétique durable [2].

2 Matériels et Méthode

2.1 Matériels

2.1.1 Localisation

La zone d'étude est la Région Vatovavy, du Sud-Est de Madagascar. Elle est issue de la scission de Vatovavy-Fitovinany en 2021, se séparant de Fitovinany pour devenir la 23^{ème} région de Madagascar. Elle se trouve à 21°Sud, 48°Est.

La région Vatovavy se place dans la côte Centre- Est de Madagascar. Elle est un peu plus au Sud par rapport à la région Atsinanana. Son chef-lieu est la Commune urbaine de Mananjary et les districts qui la composent, ce sont le district de Mananjary, le district de Nosy Varika ainsi que le district d'Ifanadiana. Le chef-lieu de Région se trouve à 560 km de la capitale de Madagascar Antananarivo.

La Région Vatovavy contient 64 communes dont 15 dans le district d'Ifanadiana, 19 dans le district de Nosy Varika et 30 communes dans le district de Mananjary.

2.1.2 Limitrophe

La région Vatovavy est délimitée au Nord par la Région Atsinanana, à l'Ouest par la Région Haute Matsiatra, au Sud par la Région Fitovinany ainsi qu'à l'Est par le vaste Océan Indien. La région a une superficie totale de 13069 km² et la densité moyenne de la population est de 54 hab/km².

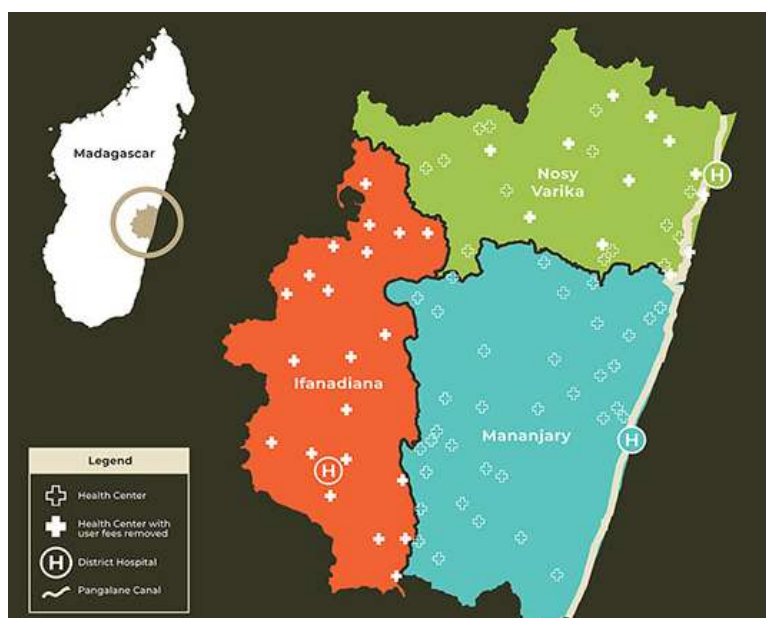


Figure 1:: Cartographie de la région Vatovavy

Source : [5]

2.1.3 Climat

a. Température

La température varie de 29°C à 32°C pendant la saison chaude dont cette dernière est du mois de septembre, octobre, novembre, décembre, janvier et février. Cependant au mois de Mars et Avril, la température baisse un peu et varie entre 25°C à 29°C. Au mois de mai, juin, juillet et août, la température peut être diminuée jusqu'à 20°C. Durant ce temps, c'est la saison hivernale.

b. Pluviométrie

Autant que la variation de température, la saison de pluie est divisée en trois grandes parties dont celle la plus abondante est entre le mois de novembre et le mois de mars. C'est la période cyclonique et la présence du cyclone ainsi que des pluies torrentielles sont fort probable. L'autre saison, c'est l'hiver, la précipitation est moyenne. Cependant, la dernière saison est la saison sèche dont l'existence de pluie est rare presque pendant la plupart de temps. Cette saison est le mois de septembre jusqu'au mois de décembre.



Figure 2.: Climat de la région Vatovavy

Source : [6]

2.2 Méthode

La méthodologie scientifique adoptée consiste respectivement à passer à travers les six phases suivantes :

- Phase 1 : Acquisition des données
- Phase 2 : Analyse de la variabilité climatique
- Phase 3 : Modélisation climatique saisonnière
- Phase 4 : Évaluation des ressources renouvelables
- Phase 5 : Analyse multicritère
- Phase 6 : Cartographie et classement

2.2.1 Phase 1 : Acquisition des données

Les sources d'acquisition des données possibles peuvent être obtenues à partir :

- des données météorologiques locales ;
- des stations climatiques ;
- des bases climatiques satellitaires ;
- des observations de terrain.

Les variables sont respectivement :

- Tmin = température minimale ;
- Tmax = température maximale ;
- P = précipitation ;
- V = vitesse du vent ;
- G = ensoleillement.

2.2.2 Phase 2 : Analyse de la variabilité climatique

Cette phase consiste à déterminer respectivement : les moyennes mensuelles, les extrêmes, les amplitudes et les variations saisonnières.

- Amplitude climatique (A) :

$$A = X_{\max} - X_{\min}$$

où : A : représente l'amplitude climatique.

2.2.3 Phase 3 : Modélisation climatique saisonnière

La modélisation climatique saisonnière consiste à faire une analyse saisonnière pendant :

- la saison humide ;
- la saison sèche relative ;
- la saison chaude ;
- la saison fraîche.

Cela consiste à identifier les périodes par saison. Le tableau 1 présente les mois correspondants à chaque saison de la région Vatovavy

Tableau 1 : Correspondance entre les différentes saisons et les mois de l'année.

Saison	Mois
Humide	Décembre – Mars
Transition	Avril – Mai
Fraîche	Juin – Août
Chaude	Septembre – Novembre

Ce tableau informe les mois correspondants à chaque saison dans la région Vatovavy.

2.2.4 Phase 4 : Évaluation des ressources renouvelables

- Les indicateurs pour chaque ressource renouvelable sont les suivants :
- Pour la ressource solaire, l'indicateur correspondant est : G_{moy} ou rayonnement moyen journalier.
- Pour la ressource éolienne, l'indicateur correspondant est : V_{moy} = vitesse moyenne annuelle
- Pour la ressource hydraulique, l'indicateur correspondant est : $P_{annuelle}$ = Pluviométrie annuelle

2.2.5 Phase 5 : Analyse multicritère

Pour classer les ressources renouvelables dans la région Vatovavy, il faut attribuer un score à chaque ressource selon les critères envisagés. Le tableau 2 présente ces critères

Tableau 2 : Critères de classification des ressources énergétiques

Critères	Ressources renouvelables			
	Solaire	éolien	Hydraulique	biomasse
Disponibilité				
Régularité				
Accessibilité				
Faisabilité				
Rentabilité				

Puis :

$$Score = \sum_{i=1}^n C_i$$

2.2.6. Phase 6 : Cartographie et classement

Cette sixième phase consiste à produire de résultats synthétiques de classement en ressource renouvelable de la région.

2.3 Formulation académique de la Méthodologie

La démarche méthodologique adoptée repose sur l'analyse des paramètres climatiques caractérisant la région de Vatovavy, notamment les températures minimales et maximales, les précipitations, la vitesse du vent et l'ensoleillement.

Après le traitement statistique des données et l'étude de leur variabilité saisonnière, une évaluation du potentiel des principales ressources énergétiques renouvelables a été réalisée. Les potentiels solaire, hydroélectrique et éolien ont été estimés à partir d'indicateurs climatiques représentatifs, puis comparés à l'aide d'une approche multicritère permettant leur hiérarchisation.

Cette démarche vise à identifier les ressources énergétiques les plus adaptées aux conditions climatiques de la région et à proposer des orientations pour le développement énergétique durable de Vatovavy.

La figure 2 présente une vue schématique de cette méthodologie adoptée

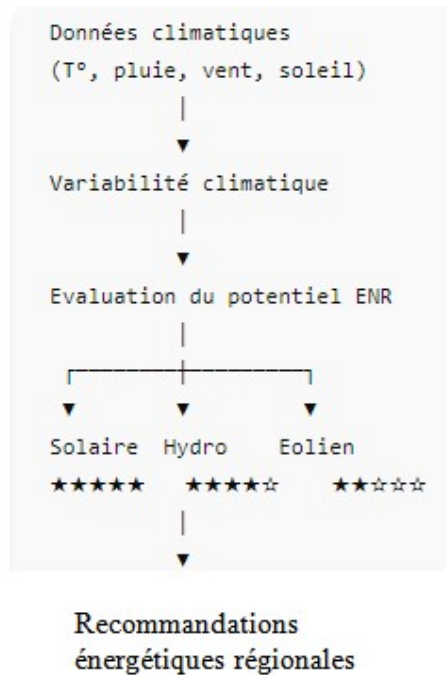


Figure 2 : vue schématique de la méthodologie à adopter dans la Région Vatovavy

3 Résultats et discussions

Le tableau 3 récapitule les données mensuelles sur la précipitation, le vent et l'ensoleillement dans la Région Vatovavy

Tableau 3: Récapitulatif des données mensuelles : précipitation, vent et ensoleillement

Mois	Tmin(°C)	Tmax(°C)	Précipitation (mm)	Vent (Km/h)	Ensoleillement (Kwh/m ² /j)
Jan.	23	26	156	6,00	6.39
Fev.	23	27	210	5,50	5.73
Mars	22	26	198	5,50	5.24
Avr.	20	27	118	4,30	5.58
Mai	18	26	125	4,01	3.80
Juin	18	26	121	3,32	3.41
Jul.	23	27	95	4,5	3.56
Aout	24	28	85	5,27	4.47
Sept.	25	29	83	6,12	5.39
Oct.	26	30	82	7,00	5.94
Nov.	27	31	80	6,54	6.55
Déc.	27	32	134	5,59	6.56

3.1 Analyse générale de la variabilité climatique annuelle

Les données du tableau 3 mettent en évidence une forte saisonnalité climatique caractérisée par :

- une alternance entre une saison chaude et humide (novembre à mars) ;
- une saison relativement fraîche et moins arrosée (mai à octobre) ;
- une variation progressive de l'ensoleillement et de la vitesse du vent selon les saisons.

Cette dynamique reflète l'influence du climat tropical humide de la côte Sud-Est de Madagascar.

3.2 Variation de la température minimale et maximale

Le tableau 4 montre la température minimale et maximale de la région Vatoavavy.

Tableau 4: Récapitulatif de la température minimale et maximale de la région Vatoavavy

Période	Tmin (°C)	Tmax (°C)
Janvier-Mars	22-23	26-27
Avril-Juin	18-20	26-27
Juillet-Octobre	23-26	27-30
Novembre-Décembre	27	31-32

3.2.1 Température minimale (Tmin)

Le tableau 4 montre respectivement que les Tmin diminuent progressivement de 23°C en janvier-février à 18°C en mai-juin. Cette baisse traduit l'arrivée de la saison fraîche australe.

À partir de juillet, les températures minimales augmentent rapidement jusqu'à atteindre 27°C en novembre et décembre.

3.2.2 Température maximale (Tmax)

Le tableau 4 montre respectivement que les Tmax restent relativement stables entre 26 et 27°C durant les six premiers mois. Une hausse continue apparaît ensuite jusqu'à 32°C en décembre, valeur maximale annuelle.

Sur le plan climatique, l'amplitude thermique annuelle (6°C) est relativement faible car l'Amplitude $A = 32^{\circ}\text{C} - 26^{\circ}\text{C} = 6^{\circ}\text{C}$. Cela confirme l'influence maritime de la côte Est malgache qui limite les écarts thermiques.

3.3 Variation annuelle des précipitations selon la température

3.3.1 Évolution des précipitations

La figure 3 montre l'évolution mensuelle des précipitations

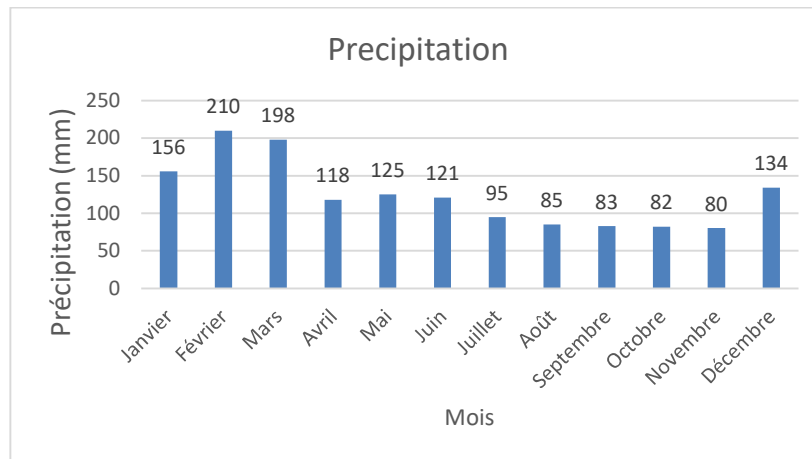


Figure 3 :: Evolution mensuelle des précipitations

A partir de ces résultats, on a pu constater que :

- Les pluies maximales sont observées au mois de :
 - Février : 210 mm
 - Mars : 198 mm
 - Janvier : 156 mm
- Les pluies minimales surviennent au mois de :
 - Novembre : 80 mm ;
 - Octobre : 82 mm ;
 - Septembre : 83 mm

3.3.2 Relation entre température et précipitations

Afin de trouver une relation entre température et précipitation, deux saisons ont été analysées : Durant la Saison humide (janvier-mars) et Saison sèche relative (août-novembre).

3.3.2.1 Saison humide (janvier-mars)

D'après le tableau 5, les températures sont relativement élevées (22–27°C), les précipitations sont abondantes (156–210 mm).

La forte chaleur favorise respectivement l'évaporation océanique, la convection atmosphérique et la formation de nuages convectifs et de fortes pluies.

3.3.2.2 Saison sèche (août-novembre)

D'après le tableau 5, les températures sont plus élevées (24–31°C), les précipitations sont faibles (80–85 mm). Cette situation montre que dans la région de Vatovavy, les précipitations ne dépendent pas uniquement de la température mais également des alizés, de la circulation atmosphérique régionale et de la position saisonnière de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT).

En bref, la relation température-précipitation est positive durant la saison humide mais devient plus faible durant la saison sèche.

3.4 Variation annuelle du vent selon la température

3.4.1 Évolution du vent

La figure 4 montre l'évolution annuelle du vent dans la région Vatovavy.

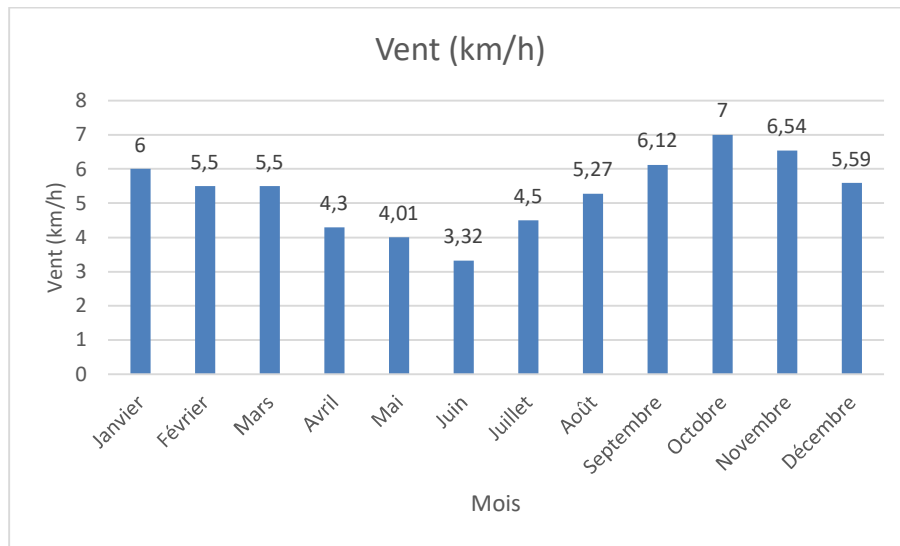


Figure 4 : Evolution annuelle du vent dans la région Vatovavy

D'après la figure 4, le vent est :

- faible entre mai et juin ;
- modéré entre août et septembre ;
- maximal en octobre (7 km/h).

La hausse du vent entre août et novembre correspond généralement au renforcement des alizés du Sud-Est.

3.4.2 Relation vent-température

On observe que lorsque les températures augmentent de septembre à décembre, la vitesse du vent augmente également.

En prenant l'exemple pour les mois de juin, octobre et décembre récapitulés dans le tableau 5.

Tableau 5: Relation vent-température pour le mois de juin, octobre et décembre

Mois	Tmax	Vent (km/h)
Juin	26°C	3,32
Octobre	30°C	7
Décembre	32°C	5,59

D'après ce tableau, cette relation suggère que le réchauffement saisonnier favorise les gradients de pression atmosphérique responsables de l'intensification du vent.

3.5 Variation annuelle de l'ensoleillement selon la température

3.5.1 Évolution de l'ensoleillement

La figure 5 montre l'évolution annuelle de l'ensoleillement selon la température dans la région Vatovavy

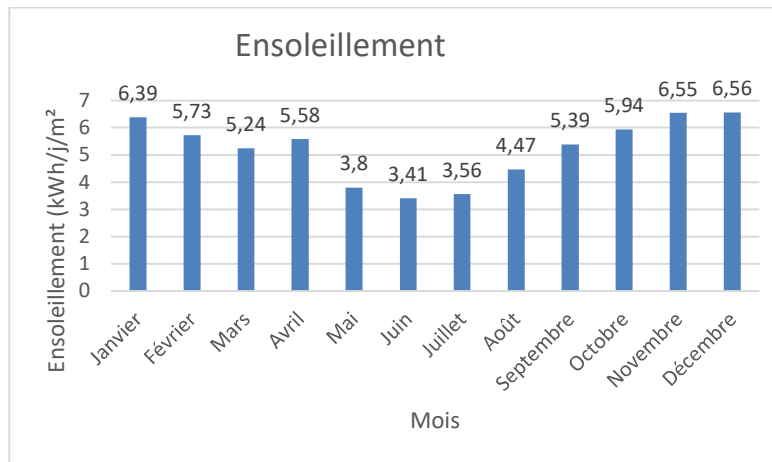


Figure 5.: Evolution annuelle de l'ensoleillement selon la température dans la région Vatovavy

D'après la figure 5, l'ensoleillement est minimal entre mai et juillet et il est maximal entre novembre et décembre.

L'augmentation de l'énergie solaire suit globalement celle des températures.

3.5.2 Relation température-ensoleillement

Une corrélation positive apparaît clairement. Le tableau 6 montre cette relation entre température et ensoleillement.

Tableau 6: Relation température-ensoleillement

Mois	Tmax	Ensoleillement
Juin	26°C	3,41
Octobre	30°C	5,94
Novembre	31°C	6,55
Décembre	32°C	6,56

Ce tableau montre que lorsque la température augmente, la durée d'ensoleillement utile augmente et le rayonnement solaire reçu à la surface devient plus important.

Cette relation est particulièrement favorable à la production photovoltaïque.

3.6 Implications pour les énergies renouvelables

3.6.1 Potentiel solaire

Les valeurs d'ensoleillement comprises entre : 3,41 à 6,56 kWh/m² dans le tableau 9 indiquent un potentiel solaire important avec l'équation de la courbe suivante :

$$y = 3.41 + \frac{(6.56 - 3.41)}{11} x$$

Selon le graphe de la figure 6.

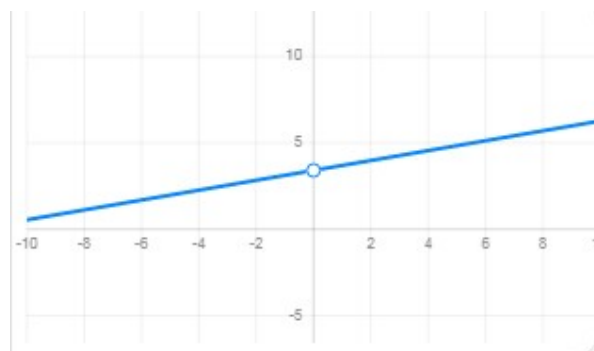


Figure 6 :: Graphe d'implication des énergies solaires dans la région Vatovavy

Ce graphe montre que les mois les plus favorables sont les mois respectifs d'octobre, novembre, décembre et mois de janvier.

Ces périodes correspondent également aux températures les plus élevées.

En bref, concernant le potentiel solaire, la région de Vatovavy présente un potentiel élevé pour :

- les centrales photovoltaïques ;
- l'électrification rurale ;
- les systèmes hybrides solaire-batterie.

3.6.2 Potentiel éolien

La vitesse du vent varie entre : 3,32 et 7 km/h (cf. tableau 7). Ces vitesses restent relativement faibles pour de grandes fermes éoliennes industrielles. Cependant, elles peuvent être exploitées pour des micro-éoliennes ou des systèmes hybrides solaire-éolien.

Les mois les plus favorables sont les mois de septembre, d'octobre et de novembre.

3.6.3 Potentiel hydroélectrique

Les précipitations importantes observées sont comprises entre les mois de décembre, janvier, février et mars. Ces précipitations favorisent respectivement :

- l'alimentation des cours d'eau ;
- les microcentrales hydroélectriques ;
- les systèmes pico-hydrauliques ruraux.

En Conclusion, les résultats révèlent une variabilité climatique saisonnière marquée dans la région de Vatovavy.

3.7 Evaluation du potentiel en énergies renouvelables dans la région Vatovavy

3.7.1. Potentiel solaire photovoltaïque

L'indicateur principal est l'ensoleillement moyen journalier.

Les données obtenues sont récapitulées dans le tableau 7.

Tableau 7: Potentiel solaire photovoltaïque

Mois	Rayonnement solaire (kWh/m ² /j)
Min	3,41
Max	6,56

A partir de ce tableau, on peut calculer la moyenne annuelle à partir de la formule suivante :

$$G = \frac{\sum_{i=1}^{12} G_i}{12}$$

Calculons la moyenne annuelle :

$$G = \frac{6.39 + 5.73 + 5.24 + 5.58 + 3.80 + 3.41 + 3.56 + 4.47 + 5.39 + 5.94 + 6.55 + 6.55}{12}$$

$$G \approx 5.22 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$$

3.7.1.1 Production solaire annuelle estimée

Pour un système photovoltaïque, on a : $E = G * 365 * \eta$

Où : $G = 5,22 \text{ kwh/m}^2/\text{j}$

: $\eta = 75\%$

On obtient : $E \approx 1429 \text{ kWh/kWc/an}$

3.7.1.2 Interprétation

Les données obtenues avec les références internationales sont récapitulées dans le tableau 8.

Tableau 8: Références internationales sur la productivité en solaire annuelle.

Productivité	Valeur
Faible	<1200 kWh/kWc/an
Bonne	1200–1400
Très bonne	1400–1700
Excellente	>1700

En se référant avec le tableau 11, la Région de Vatovavy atteint environ 1430 kWh/kWc/an, ce qui correspond à un **très bon potentiel solaire**.

3.7.1.3 Commentaire scientifique

L'énergie solaire constitue la ressource renouvelable la plus prometteuse de la région. Les valeurs d'irradiation dépassent 5 kWh/m²/j en moyenne annuelle et atteignent plus de 6,5 kWh/m²/j durant la saison chaude, permettant une production photovoltaïque régulière tout au long de l'année.

3.7.2 Potentiel éolien

En ce qui concerne les vitesses observées, les résultats sont récapitulés dans le tableau 9.

Tableau 9: Vitesse du vent observée

Mois	Vent (km/h)
Min	3,32
Max	7

En convertissant la vitesse du vent km/h en m/s, on a divisé par 3,6 la vitesse en km/h et on a obtenu les résultats suivants : $V \text{ (km/h)}/3,6$

Ainsi, au minimum, on a $\approx 0,92$ m/s et au maximum $\approx 1,94$ m/s

La moyenne annuelle est : $V_{\text{moy}} \approx 1,35$ m/s

3.7.2.1 Évaluation du potentiel éolien

Pour le potentiel éolien, le tableau 10 fournit l'information sur la classification de la performance d'une éolienne.

Tableau 10: Classification courante de performance d'une éolienne:

Vitesse moyenne	Potentiel
<3 m/s	Très faible
3–5 m/s	Faible
5–7 m/s	Moyen
>7 m/s	Bon

La vitesse moyenne d'une éolienne dans la région Vatovavy est de : $V_{\text{moy}} \approx 1,35$ m/s. Cette valeur indique un **potentiel éolien très faible**.

3.7.2.2 Densité de puissance du vent

La puissance est proportionnelle au cube de la vitesse :

$$P = 1/2 \rho V^3$$

Avec :

- $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$
- $V = 1,35 \text{ m/s}$

La puissance surfacique reste très faible.

3.7.2.3 Commentaire scientifique

Sur le plan scientifique, les vitesses de vent observées ne permettent pas une exploitation rentable de l'énergie éolienne à grande échelle. L'utilisation d'éolienne pourrait être envisagée uniquement pour de très petites applications locales ou dans des sites côtiers plus exposés où les vitesses seraient supérieures à celles mesurées.

3.7.3 Potentiel hydroélectrique (évaluation climatique)

Puisque nous ne disposons pas encore du débit des cours d'eau, de la hauteur de chute et de la section hydraulique, il est donc impossible de calculer directement la puissance hydroélectrique.

Cependant, les précipitations permettent d'estimer le potentiel hydrologique relatif.

3.7.3.1 Pluviométrie annuelle

En tenant compte des données sur la précipitation annuelle, on peut calculer la somme des précipitations :

$$P_{\text{annuelle}} = 156 + 210 + 198 + 118 + 125 + 121 + 95 + 85 + 83 + 82 + 80 + 134 = 1487 \text{ mm/an}$$

3.7.3.2 Interprétation

Pour le potentiel hydrique, le tableau 11 fournit l'information sur la classification du potentiel hydrique de la région Vatovavy.

Tableau 11: classification du potentiel hydrique de la région Vatovavy.

Pluie annuelle	Potentiel hydrique
<800 mm	Faible
800–1200 mm	Moyen
1200–1600 mm	Bon
>1600 mm	Très bon

Or, la valeur des données obtenues est de 1487mm/an. En se référant avec le tableau 14, la valeur de la pluviométrie annuelle trouvée (1487mm/an) correspond à un **bon potentiel hydrologique**.

3.7.3.3 Commentaire scientifique

Les précipitations annuelles relativement abondantes favorisent la recharge des bassins versants et l'écoulement permanent des cours d'eau. Cette situation laisse envisager un potentiel intéressant pour des installations hydroélectriques de petite puissance, notamment les microcentrales destinées à l'électrification rurale.

3.8 Analyse statistique de la variabilité saisonnière des paramètres climatiques

3.8.1 Variabilité de Température

D'après le tableau 4, on a trouvé les températures minimale et maximale dans la région Vatovavy :

3.8.1.1 Température minimale

- Tmin minimale : 18 °C (mai et juin)
- Tmin maximale : 27 °C (novembre et décembre)

L'Amplitude thermique calculée est de :

$$A = T_{\text{min,max}} - T_{\text{min,min}} = 27 - 18$$

$$A = 9^{\circ}\text{C}$$

3.8.1.2 Température maximale

- Tmax minimale : 26 °C
- Tmax maximale : 32 °C

L'Amplitude thermique calculée est de :

Amplitude : $A=32-26=6^{\circ}\text{C}$

3.8.1.3 Interprétation

L'amplitude thermique annuelle reste modérée, ce qui traduit l'influence océanique caractéristique du littoral oriental malgache. Les températures demeurent favorables à l'exploitation des technologies solaires durant toute l'année.

3.8.2 Variabilité des précipitations

En ce qui concerne la précipitation annuelle dans la région Vatovavy, on a trouvé une précipitation annuelle de : $P_{annuelle}=1487\text{ mm}$.

Par contre, la Précipitation moyenne mensuelle est de : $P_m=1487\text{ mm}/12 \approx 123,9\text{ mm/mois}$.

Le mois le plus pluvieux est le mois de Février : 210 mm tandis que le mois le moins pluvieux est le mois de Novembre avec une précipitation de 80 mm.

3.8.2.1 Indice de variation (I.V)

C'est le rapport entre la précipitation du mois le plus pluvieux avec le mois le moins pluvieux

Ainsi : $I.V=P_{max}/P_{min} = 210\text{ mm}/80\text{ mm} = 2,63$

3.8.2.2 Interprétation

La pluie du mois le plus humide est environ 2,63 fois supérieure à celle du mois le plus sec, ce qui met en évidence une saisonnalité pluviométrique marquée.

3.8.3 Variabilité du vent

Les données obtenues ont permis de déterminer le Vent minimum : 3,32 km/h et le Vent maximum : 7 km/h. L'Amplitude est de : 3,68 km/h. Ce résultat montre que la variation saisonnière du vent reste relativement faible. Cette faible amplitude explique le potentiel éolien limité observé dans la région.

3.8.4 Variabilité de l'ensoleillement

Les valeurs extrêmes obtenues sont :

- 3,41 kWh/m²/j (juin) pour l'ensoleillement minimum ;
- 6,56 kWh/m²/j (décembre) pour l'ensoleillement maximum

L'Amplitude est de : $6,56-3,41 = 3,15\text{ kWh/m}^2/\text{j}$

3.8.4.1 Indice de variation (I.V)

C'est le rapport entre l'ensoleillement du mois le plus ensoleillé avec le mois le moins ensoleillé. Ainsi $I.V = 1,92$

3.8.4.2 Interprétation

Le rayonnement solaire reste disponible toute l'année malgré une baisse durant l'hiver austral. Cette stabilité est favorable aux systèmes photovoltaïques.

3.9 Corrélations climatiques

3.9.1 Corrélations climatiques : Température et ensoleillement

D'après le tableau 6, l'augmentation de la température maximale s'accompagne d'une augmentation du rayonnement solaire.

Il existe donc une corrélation positive entre la température maximale et l'ensoleillement.

Cette relation est particulièrement favorable à la production photovoltaïque.

3.9.2 Corrélations climatiques : Température et précipitation

Les précipitations sont élevées entre janvier et mars alors que les températures sont modérées (26–27 °C).

En revanche, les mois de septembre à novembre montrent des températures élevées mais des précipitations faibles. Cette situation montre que la pluie n'est pas directement contrôlée par la température. Elle dépend davantage de la circulation atmosphérique, des alizés et de la position saisonnière de la ZCIT.

3.9.3 Corrélations climatiques : Température et vent

On observe généralement une augmentation simultanée de la température et de la vitesse du vent entre le mois d'août et novembre. Cependant la relation demeure modérée.

Nous allons déterminer le potentiel énergétique saisonnier pour quatre saisons différentes : saison humide, saison de transition, saison fraîche et saison chaude.

3.9.3.1 Saison humide (Décembre-Mars)

Elle est caractérisée par de fortes précipitations, des températures élevées et de bon ensoleillement.

- ***Ressource renouvelable dominante***

Pour la saison humide, la ressource renouvelable dominante est l'hydroélectricité.

Hydroélectricité

Les fortes pluies favorisent l'alimentation des cours d'eau, c'est-à-dire la mise en place des microcentrales et des pico-centrales rurales.

3.9.3.2 Saison de transition (Avril-Mai)

Elle est caractérisée par une baisse progressive des pluies et un ensoleillement encore satisfaisant.

- ***Ressource renouvelable dominante***

Pour la saison de transition, la ressource renouvelable dominante est le solaire photovoltaïque et la petite hydroélectricité.

3.9.3.3 Saison fraîche (Juin-Août)

Elle est caractérisée par un ensoleillement minimum, un vent légèrement plus fort et des pluies modérées.

- ***Ressource renouvelable dominante***

Pour la saison fraîche, la ressource renouvelable dominante est le solaire (toujours exploitable malgré la baisse de productivité).

3.9.3.4 Saison chaude (Septembre-Novembre)

Elle est caractérisée respectivement par des températures maximales, un ensoleillement très élevé et un vent maximal.

- **Ressource renouvelable dominante**

Pour la saison chaude, la ressource renouvelable dominante est le Solaire photovoltaïque et la Production attendue maximale durant cette période.

3.10 Résultat synthétique de classement du potentiel ENR de la Région Vatovavy

Le tableau 12 récapitule les ressources renouvelables exploitables ainsi que l'indicateur climatique, le niveau de potentialité énergétique ainsi que les valeurs correspondantes et son classement.

Tableau 12 : Récapitulatif des paramètres d'exploitabilité des ressources renouvelables dans la région Vatovavy.

Ressource	Indicateur climatique	Valeur observée	Niveau de potentialité	Classe
Solaire photovoltaïque	Ensoleillement moyen	5,22 kWh/m ² /j	Très favorable	Très élevé
Hydroélectricité	Précipitation annuelle	1487 mm/an	Favorable	Élevé
Éolien	Vitesse moyenne du vent	1,35 m/s	Peu favorable	Faible

L'analyse des paramètres climatiques observés dans la région de Vatovavy montre que le potentiel des énergies renouvelables est dominé par la ressource solaire. Le rayonnement moyen annuel de 5,22 kWh/m²/j permet d'envisager une production photovoltaïque estimée à environ 1430 kWh/kWc/an, traduisant un potentiel énergétique élevé et régulier.

4 Conclusion

Cette étude a permis de mettre en évidence la variabilité climatique saisonnière de la région de Vatovavy et d'évaluer son potentiel en énergies renouvelables. Les résultats montrent que les conditions climatiques de la région sont favorables au développement des énergies renouvelables, en particulier de l'énergie solaire, qui représente la ressource la plus prometteuse grâce à son important niveau d'ensoleillement. L'hydroélectricité constitue également une option intéressante, tandis que le potentiel éolien reste limité en raison des faibles vitesses de vent observées.

Ainsi, le développement énergétique de la région devrait privilégier l'exploitation de l'énergie solaire, complétée par les ressources hydrauliques locales. Cette recherche fournit des informations utiles pour la planification énergétique régionale et souligne l'importance de poursuivre les études avec des données plus détaillées afin d'améliorer l'évaluation des ressources disponibles et de promouvoir un développement énergétique durable à Vatovavy.

Références

- [1] Electricity generation from renewables in Madagascar: Opportunities and projections (2017).
- [2] Mamy Nirina Randrianarivelo et collaborateurs (2022), Changement climatique et transition énergétique : quel avenir pour Madagascar ?
- [3] Mamy Nirina Randrianarivelo et collaborateurs (2022), Optimisation de la planification énergétique à Madagascar face aux impacts de la variabilité et du changement climatique.
- [4] Climate change risks and adaptation options for Madagascar (2021). [5] <https://hms.harvard.edu/sites/default/files/2025-10/550%20map.jpg>
- [6] <https://www.scribd.com/document/812649728/MONOGRAPHIE-VATOVAVY-2022>