

*Étude De La Variabilité Saisonnière Climatique Et Contribution
Potentielle Des Energies Renouvelables : Modélisation
Appliquée A La Région Fitovinany (Madagascar)*
[Study Of Seasonal Climate Variability And The Potential
Contribution Of Renewable Energies: Modeling Applied To The
Fitovinany Region (Madagascar)]

El-dara Basile RAMANITRARIVO¹, RAMAMONJISOA Mamitiana², RASOANAIVO Jean luc³, Achille
RAVONINJATOVO⁴, Lala ANDRIANAIVO⁵

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

Email : ramanitrarivoeldarabasile@gmail.com

²Ecole Doctorale en Génie des Procédés Industriels, Agricoles et Alimentaires (GPSIAA)
Université d'Antananarivo

Centre National de Recherches Industrielle et Technologique

BP 6294 Fiadanana, Antananarivo

Email : mtr_mamitiana@yahoo.fr

³Ecole Doctorale en Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation
Université d'Antananarivo

Centre National de Recherches Industrielle et Technologique

BP 6294 Fiadanana, Antananarivo

Email : jeanlucnj@gmail.com

⁴Ecole Doctorale en Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation
Université d'Antananarivo

Centre National de Recherches Industrielle et Technologique

BP 6294 Fiadanana, Antananarivo

Email : achillegc@yahoo.fr

⁵Ecole Doctorale en Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation
Université d'Antananarivo

Ecole Supérieur Polytechnique d'Antananarivo

Université d'Antananarivo

Email : andrianaivo.andri@gmail.com

Auteur correspondant: El-dara Basile RAMANITRARIVO, Email : ramanitrarivoeldarabasile@gmail.com



Résumé : L'énergie nouvelle est envahie et rependu au monde dans notre millénaire. Madagascar a beaucoup de fruit à la production de l'électricité dans les secteurs des énergies renouvelables de plus sur ces trois branches de production comme l'énergie solaire, l'énergie éolienne et l'hydroélectricité. Madagascar a des impacts et de la vulnérabilité par de variabilité climatique, mais en générale se subdivise en deux climats durant l'année et ceci varie selon la localité étudier. En effet, cette connaissances cognitives sur le changement climatique peut nous faire de l'étude préalable d'élaborer le calcul sur les formules enfin de promouvoir des résultats dans le dernier chapitre. Après l'investigation effectuée au niveau du district, c'est-à-dire dans la région de Fitovinany les ressources énergétiques dans cette localité sont exploitables et pourront la développer.

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 Fitovinany, Madagascar. À partir des données climatiques historiques (précipitations, irradiation solaire, vent). En fait, la région Fitovinany a une potentialité en ressource énergétique. Les données climatiques collectées sur place dans la région permettront d'élaborer un modèle de source d'énergie approprié dans le travail de recherche. Cette recherche modélise la production énergétique attendue pour chaque saison et évalue la fiabilité et la continuité de l'approvisionnement. L'étude montre que les fluctuations saisonnières influencent directement la performance des systèmes énergétiques renouvelables et souligne l'importance de plans d'adaptation énergétique pour assurer la sécurité énergétique locale.

Mots clés : Variabilité Climatique, Energies Renouvelables, Modélisation Energétique, Irradiation Solaire, Précipitations, Sécurité Energétique.

Abstract: New energy sources are flooding and spreading throughout the world in this millennium. Madagascar has significant potential for electricity production in the renewable energy sector, particularly in three main areas: solar, wind, and hydroelectric power. Madagascar is impacted and vulnerable by climate variability, but generally experiences two distinct climates throughout the year, varying depending on the location. This understanding of climate change allows us to conduct preliminary studies, develop calculations based on formulas, and ultimately present results in the final chapter. Following the investigation conducted at the district level, specifically in the Fitovinany region, the energy resources in this area are exploitable and can be further developed.

The study aims to analyze the seasonal variability of the climate and its impact on the potential of renewable energies (solar, wind, hydro) in the Fitovinany region of Madagascar. This analysis is based on historical climate data (precipitation, solar irradiation, wind). In fact, the Fitovinany region has significant energy resource potential. Climate data collected locally in the region will allow for the development of an appropriate energy source model in the research. This research models the expected energy production for each season and assesses the reliability and continuity of supply. The study shows that seasonal fluctuations directly influence the performance of renewable energy systems and highlights the importance of energy adaptation plans to ensure local energy security.

Keywords: Climate Variability, Renewable Energy, Energy Modeling, Solar Radiation, Precipitation, Energy Security.

INTRODUCTION

La variabilité climatique constitue aujourd'hui l'un des principaux défis pour le développement durable, en particulier dans les pays vulnérables aux aléas météorologiques [1]. Les fluctuations interannuelles et saisonnières des précipitations, de la température, de l'irradiation solaire et des régimes de vent influencent directement les systèmes socio-économiques, notamment les secteurs agricole et énergétique. Dans les pays insulaires tropicaux comme Madagascar, ces perturbations sont amplifiées par une forte exposition aux cyclones, aux épisodes de sécheresse et aux inondations, rendant les régions côtières particulièrement sensibles[2].

La région Fitovinany, située sur la façade sud-est de Madagascar, figure parmi la zone la plus affectée par la variabilité climatique. Elles subissent régulièrement des cyclones tropicaux accompagnés de fortes précipitations, mais également des périodes de déficit hydrique. Cette instabilité climatique influence non seulement les activités agricoles, principale source de revenus des populations locales, mais également la disponibilité et la performance des ressources énergétiques renouvelables.

Parallèlement, la transition énergétique représente un enjeu stratégique pour Madagascar, où l'accès à l'électricité demeure limité dans plusieurs zones rurales. Le développement des énergies renouvelables, notamment le solaire photovoltaïque, l'hydroélectricité de petite échelle et la biomasse apparaît comme une solution prometteuse pour améliorer l'accès à l'énergie tout en réduisant la dépendance aux combustibles traditionnels [3]. Toutefois, la production d'énergie renouvelable est

intrinsèquement dépendante des conditions climatiques. Par exemple, l'hydroélectricité dépend directement du régime pluviométrique, tandis que le solaire photovoltaïque est influencé par l'irradiation et la nébulosité saisonnière.

Malgré l'importance stratégique de ces régions, peu d'études ont analysé de manière intégrée la relation entre variabilité climatique saisonnière et contribution potentielle des énergies renouvelables à l'échelle régionale. L'absence de modèles prédictifs adaptés limite la capacité des décideurs à planifier efficacement les investissements énergétiques dans un contexte de changement climatique.

Dans ce contexte, la présente étude vise à analyser la variabilité saisonnière des paramètres climatiques dans la région Fitovinany à partir de données historiques, puis à évaluer leur influence sur le potentiel et la contribution des énergies renouvelables. L'objectif est de développer un modèle statistique permettant d'identifier les corrélations significatives entre variables climatiques et production énergétique, et de proposer un outil d'aide à la décision pour la planification énergétique régionale.

Plus spécifiquement, cette recherche poursuit trois objectifs :(i) caractériser la variabilité saisonnière des principaux paramètres climatiques ;(ii) analyser les relations statistiques entre ces paramètres et la production énergétique renouvelable ;(iii) proposer un modèle prédictif adapté au contexte régional.

Les résultats attendus contribueront à renforcer la résilience énergétique des territoires étudiés et à orienter les politiques publiques vers une intégration plus efficace des énergies renouvelables face aux défis climatiques.

1. Matériels et Méthode

1.1. Matériels

1.1.1. Zone d'étude :Fitovinany

Fitovinany est une [région](#) du Sud-Est de [Madagascar](#). Elle est issue de la scission de [Vatovavy-Fitovinany](#) en 2021. Son chef-lieu est la ville de [Manakara](#). Elle se trouve à [22°08'42"Sud, 48°00'36"Est](#). La région est subdivisée en trois districts et 86 [communes](#) dont :

- [District de Manakara](#): 48 communes
- [District d'Ikongo](#): 17 communes
- [District de Vohipeno](#): 21 communes

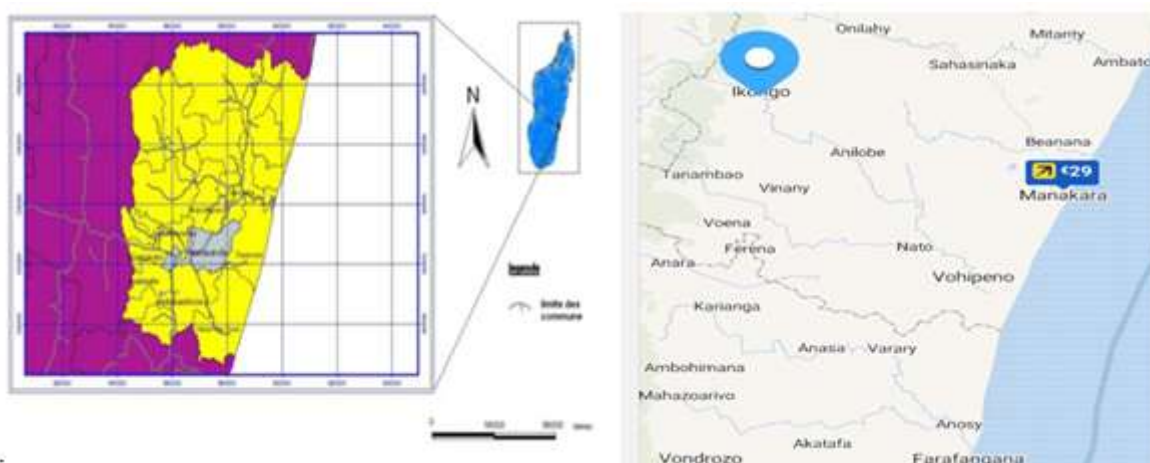


Figure 1 : Cartographie de la région Fitovinany (Source : PRD Fitovinany)

Selon le profil régional issu de l'évaluation nationale de Référence à la préparation aux catastrophes (NDPBA) à Madagascar, la Région Fitovinany avec 734 982 habitants en 2018 a un taux de pauvreté extrême de 73,9%, un taux d'analphabétisation de

62,6% avec une vulnérabilité élevée [4]. Par rapport à l'exposition aux multi risques (MHE) et à la capacité d'adaptation (CC), la Région Fitovinany a un taux d'accès des ménages à l'eau potable et à l'électricité de l'ordre de 23,3% chacun.

1.1.2. Outils

En général, on utilise ces outils comme le logiciel Excel et QGIS, ceux-ci peuvent construire et d'élaborer les données en vigueur.

✓ Excel

Le logiciel Excel est utilisé pour effectuer de calcul et de construire des courbes et des diagrammes .

✓ QGIS

Le logiciel QGIS permet d'élaborer la cartographie de la région Fitovinany.

1.2. Méthode

Dans la partie méthodologie, nous allons adopter une approche quantitative, en se concentrant sur les analyses descriptive et de corrélation. Nous définirons également le coefficient de détermination R^2 qui est essentiel pour la modélisation à l'aide de la méthode de régression multiple. Cette approche sera ensuite validée par des tests de robustesse afin d'évaluer la calibration et d'analyser le terrain. Enfin, nous présenterons ses éléments dans un tableau récapitulatif de la méthodologie adoptée.

1.2.1. Approche quantitative

L'approche quantitative a été adoptée pour analyser la variabilité saisonnière du climat et son impact sur les énergies renouvelables. Les étapes principales comprennent une analyse descriptive, suivie respectivement d'une analyse corrélative, une modélisation par régression multiple et des tests de robustesse.

1.2.2. Analyse descriptive

Elle a comme **objectif de décrire** les caractéristiques climatiques saisonnières (température, précipitations, vent, ensoleillement). Conformément aux données collectées au niveau de la zone d'étude, on essaie à travers ces données de déterminer respectivement :

- La Moyenne mensuelle des températures minimales et maximales.
- La Somme mensuelle des précipitations ;
- La Moyenne du vent et de l'ensoleillement.

Cette étape permet de **visualiser la saisonnalité**

1.2.3. Analyse de corrélation

Cette analyse de corrélation a comme objectif d'identifier la relation entre les variables climatiques et le potentiel des énergies renouvelables (ex. solaire et éolien).

L'approche méthodologique consiste à calculer le coefficient de corrélation de Pearson (r).

Le coefficient de corrélation linéaire de Pearson mesure l'intensité et le sens de la relation linéaire entre deux variables quantitatives.

Il est défini par la formule :

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum(y_i - \bar{y})^2}}$$

où :

- x_i = précipitations mensuelles
- y_i = irradiation mensuelle
- \bar{x} = moyenne des précipitations
- \bar{y} = moyenne de l'irradiation

Le coefficient de corrélation de Pearson permet de vérifier si un fort ensoleillement est corrélé à une faible précipitation.

Les résultats obtenus peuvent être interprétés comme suit :

- r proche de +1 → forte corrélation positive.
- r proche de -1 → forte corrélation négative.
- r proche de 0 → pas de corrélation significative.

1.2.4. Définition du coefficient de détermination R^2

Le coefficient de détermination est défini comme : $R^2 - r^2$

Où : r : est le coefficient de corrélation de Pearson

R^2 : proportion de la variance de la variable dépendante expliquée par la variable indépendante.

Pour notre cas : x : est la précipitation et y : l'irradiation solaire.

1.2.5. Modélisation par régression multiple

La modélisation par régression multiple a pour objectif de prédire le potentiel énergétique à partir des variables climatiques.

L'approche méthodologique à définir correspond respectivement :

- Les Variables dépendantes : production potentielle d'énergie solaire, éolienne.
- Les Variables indépendantes : température, précipitations, vent, ensoleillement.

Prenons comme exemple le modèle simple de formule générale suivante :

- Formule générale :

$$\text{Énergie} = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \beta_2 \cdot X_2 + \beta_3 \cdot X_3 + \varepsilon$$

où :

- X_1 = Ensoleillement
- X_2 = Température
- X_3 = Précipitations
- ε = Erreur du modèle

Cette modélisation permet de quantifier l'impact relatif de chaque facteur climatique sur la production d'énergie [5].

1.2.6. Tests de robustesse

Ces tests de robustesse ont comme objectif de vérifier la fiabilité et la stabilité des résultats du modèle.

La méthode courante la plus utilisée comprend respectivement :

- La validation croisée (cross-validation).
- L'analyse des résidus pour détecter les anomalies ou erreurs.
- La comparaison des coefficients avec des sous-ensembles de données (ex. saisons humides vs sèches).

Cela assure que le modèle est **robuste face aux variations climatiques saisonnières**.

1.2.7. Calibration et Analyse terrain

Elle consiste à intégrer les **observations réelles** et les **données locales** pour améliorer le modèle. Cette étape permet d'avoir une **vision pratique et opérationnelle** adaptée à la région de Fitovinany

2.2.8. Tableau récapitulatif de la méthodologie adoptée

Le tableau 1 présente une vue synthétique de la méthodologie adoptée dans le cadre de ce travail de recherche.

Tableau 1 : Synthèse de la méthodologie

Étape Méthodologique	Objectif	Variabes / Données Utilisées (Manakara)	Analyse / Actions	Résultat Attendu
1. Analyse descriptive	Décrire le climat et identifier les saisons	Température min/max (°C), Précipitation (mm), Vent (km/h), Ensoleillement (kWh/m ² /j)	Calculer moyennes mensuelles, visualiser tendances, identifier saison des pluies (Janv–Mars) et saison sèche (Sept–Nov)	Compréhension claire de la saisonnalité et des conditions climatiques
2. Analyse de corrélation	Identifier le lien entre climat et production énergétique	Température, Précipitation, Vent, Ensoleillement vs potentiel énergie solaire/éolien	Calculer coefficient de corrélation (r) entre variables	Déterminer quelles variables climatiques influencent le plus la production énergétique
3. Modélisation par régression multiple	Prédire la production d'énergie selon le climat	Variabes climatiques comme variables indépendantes, production énergétique comme variable dépendante	Ajuster modèle : Énergie = $\beta_0 + \beta_1X_1 + \beta_2X_2 + \beta_3X_3 + \varepsilon$	Prévision quantitative de l'énergie produite pour chaque saison et type d'énergie
4. Tests de robustesse	Vérifier la fiabilité du modèle	Modèle de régression, données climatiques	Validation croisée, analyse des résidus, comparaison saison humide vs sèche	Modèle robuste et stable pour différentes conditions climatiques
5. Calibration & Analyse terrain	Intégrer les observations réelles pour ajuster le modèle	Données réelles de terrain (ex. pluies, vent, soleil)	Ajuster les prédictions selon saison des pluies et saison sèche	Modèle opérationnel, adapté aux conditions locales et utile pour planification énergét

La figure 2 présente une vue schématique de cette méthodologie adoptée

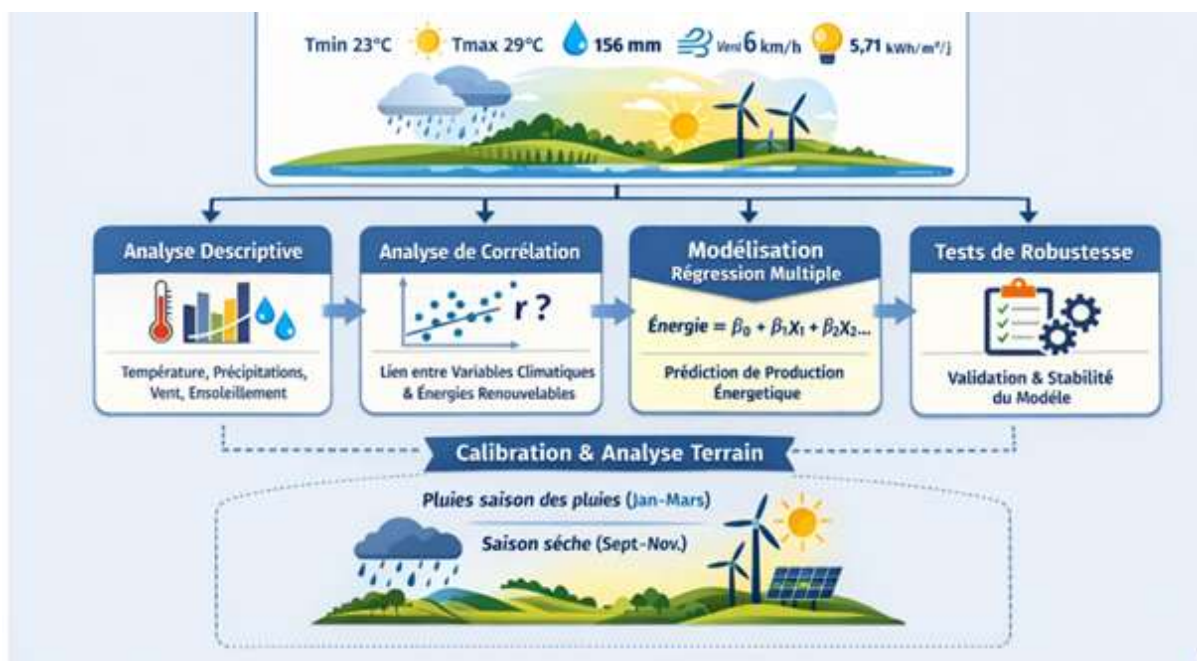


Figure 2 : vue schématique de la méthodologie à adopter dans la Région Fitovinany

2. Résultats

Dans cette partie, nous allons montrer les données climatiques et les résultats sur les analyses quantitatives, descriptives et de corrélation. Ensuite, les graphes selon la subdivision des saisons et les étapes des calculs notamment la moyenne, les écart-types, le coefficient de Pearson et le coefficient de détermination sont présentés.

2.1. Données climatiques

Le tableau 2 récapitule les données mensuelles sur la précipitation, le vent et l'ensoleillement dans la Région Fitovinany

Tableau 2 : Récapitulatif des données mensuelles : précipitation, vent et ensoleillement

Mois	Tmin (°C)	Tmax (°C)	Précipitation (mm)	Vent (km/h)	Ensoleillement (kWh/m²/j)
Janv.	23	29	156	6	5,71
Fév.	22	30	210	5,5	5,43
Mars	21	28	198	5,5	5,14
Avr.	19	27	118	4,3	4,7
Mai	17	25	125	4,01	4,05
Juin	14	23	121	3,32	3,71

Juil.	16	24	95	4,5	3,8
Août	18	25	85	5,27	4,7
Sept.	20	26	83	6,12	5,65
Oct.	23	28	82	7	5,98
Nov.	22	30	80	6,54	6,24

La figure 3 montre le graphe d'évolution mensuelle de la température, de la précipitation, du vent et de l'ensoleillement dans la Région Fitovinany .

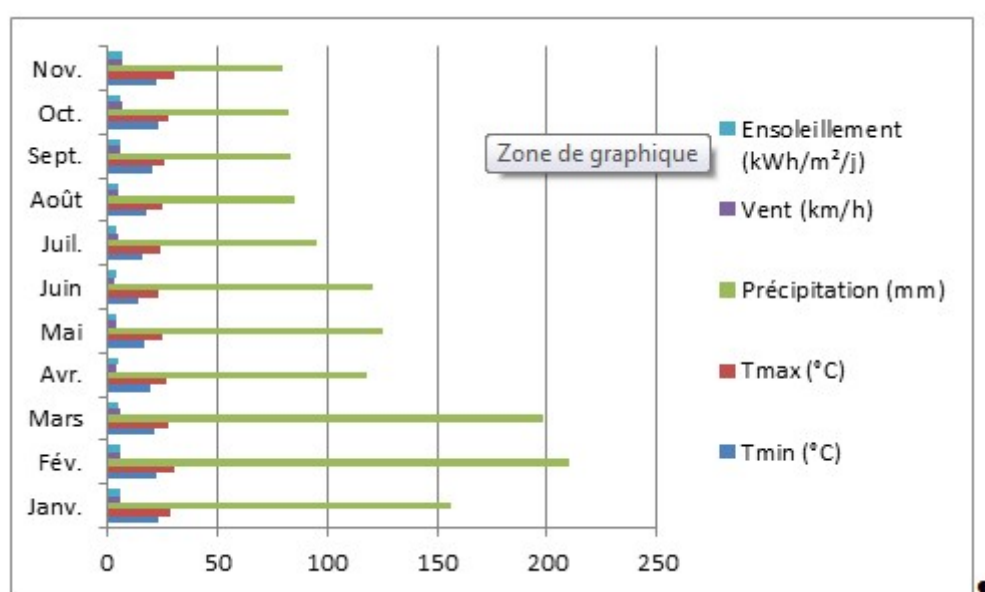


Figure 3 : Graphe d'évolution mensuelle de température, de précipitation, du vent et de l'ensoleillement

Ce graphe montre la variation saisonnière des pluies, du vent et de l'ensoleillement dans la Région Fitovinany.

- **En saison des pluies (janvier à mars)** : on constate des fortes précipitations, du vent modéré et de l'ensoleillement réduit. Cette situation a un impact sur l'énergie solaire mais présente un avantage sur la possibilité d'énergie hydro-électrique.
- **En Saison sèche (septembre à novembre)** : on a enregistré une faible pluie, un vent plus soutenu, ce qui présente un bon potentiel pour le solaire et l'éolien.

2.2. Résultat de l'analyse descriptive

Afin de comprendre les caractéristiques climatiques saisonnières et identifier les tendances, on a enregistré respectivement

- La Température minimale (Tmin) et maximale (Tmax)
- Les Précipitations (mm)
- La vitesse du Vent (km/h)

D'après les résultats collectés sur terrain sur le tableau 2, on a obtenu les résultats suivants :

En Janvier : Tmin 23 °C, Tmax 29 °C, Précipitation 156 mm, Vent 6 km/h et Ensoleillement 5,71 kWh/m²/j

En Saison sèche : A partir de Septembre jusqu'au mois de Novembre, les précipitations sont plus faibles, le vent est plus soutenu, ce qui correspond à une meilleure période pour le solaire et l'éolien

2.3. Résultat de l'analyse de corrélation

Afin de déterminer le lien entre variables climatiques et production potentielle d'énergies renouvelables, on a calculé le **coefficient de corrélation de Pearson (r)** entre chaque variable climatique et le potentiel énergétique (solaire ou éolien) et de vérifier si certaines variables influencent fortement l'énergie disponible.

2.3.1. Etapes de calcul des moyennes

En intégrant la valeur des données sur la précipitation et l'irradiation, on a obtenu les valeurs suivantes :

- Moyenne pour la précipitation

$$\bar{x} = 123.92 \text{ mm}$$

- Moyenne pour l'irradiation :

$$\bar{y} = 5.01 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$$

2.3.2. Etapes de calcul des écarts à la moyenne

Pour chaque mois on essaie de calculer

$$(x_i - \bar{x})$$

et

$$(y_i - \bar{y})$$

2.3.3. Etapes de calcul de la variance

On a calculé respectivement :

$$\sum (x_i - \bar{x})^2$$

Et

$$\sum (y_i - \bar{y})^2$$

2.3.4. Calcul du coefficient de Pearson (r)

Après substitution des valeurs numériques

On a trouvé la valeur de $r = 0,02$

Cette valeur de r signifie que la relation linéaire est quasi inexistante.

Les variations de pluie n'expliquent pas directement les variations d'irradiation.

2.4. Calcul et graphe

2.4.1. Calcul de coefficient de détermination

En application numérique, on a obtenu :

$$r=0,02$$

$$\text{Donc : } R^2 = (0,02)^2 = 0,0004$$

Cela signifie que : $R^2 \times 100 = 0,04\%$, c'est-à-dire que 0,04% seulement de la variation de l'irradiation solaire est expliquée par la précipitation mensuelle. C'est une valeur extrêmement faible. Cette valeur confirme l'absence de relation linéaire significative entre ces deux valeurs.

Ainsi dans le contexte climatique de la Région Fitovinany, les précipitations ne constituent pas un facteur explicatif majeur de la variabilité du potentiel solaire, ce qui renforce la pertinence d'un système énergétique hybride combinant hydroélectricité et photovoltaïque.

2.4.2. Graphe

3..4.2.1. La courbe de la précipitation

La figure 4 montre respectivement les **Courbes mensuelles précipitations dans la Région Fitovinany.**

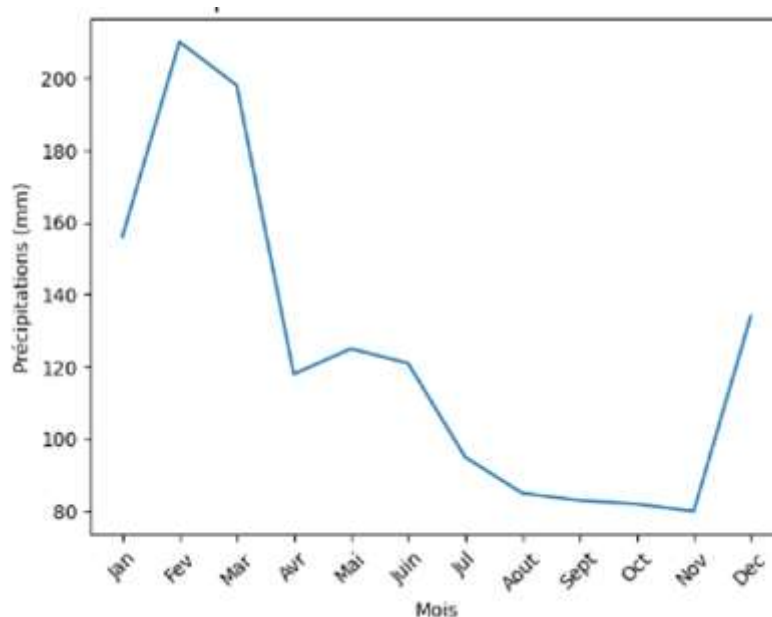


Figure 4 : Courbes mensuelles de précipitations -Région Fitovinany.

Cette courbe permet de visualiser la corrélation directe et les délais de réponse hydrologique.

Le pic pluviométrique est observé en **février (210 mm) et mars (198 mm).**

Le minimum pluviométrique est observé entre **septembre et novembre (~80-83 mm).**

3.4.2.2. La courbe d'irradiation solaire

La figure 5 montre respectivement les **courbes mensuelles d'irradiation solaire dans la Région Fitovinany.**

L'irradiation minimale se trouve au mois de **juin (3,71 kWh/m²/j)** et l'irradiation maximale est en **novembre (6,24 kWh/m²/j)**.

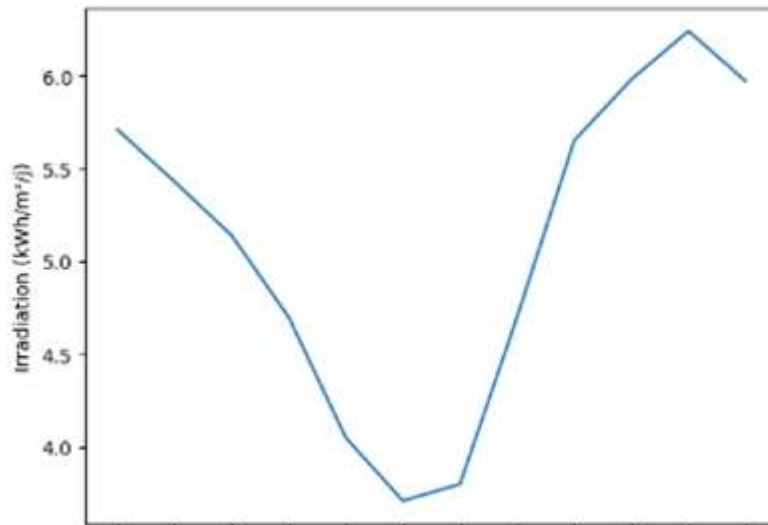


Figure 5 : Courbes mensuelles d'irradiation solaire dans la Région Fitovinany

3.4.2.3. Histogrammes de la précipitation

La figure 6 montre la comparaison de l'histogramme des années sèches et humides dans la Région Fitovinany.

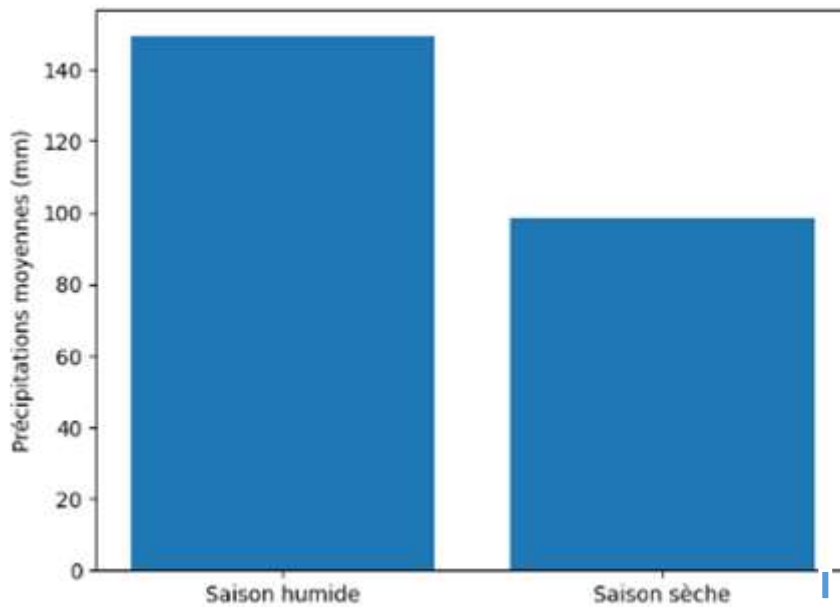


Figure 6 : comparative histogrammes des années sèches et humides dans la Région Fitovinany

Ces histogrammes comparatifs des années sèches et humides mettent en évidence l'amplitude des écarts interannuels et la vulnérabilité du système.

3.5. Elaboration de modèle pour la Région Fitovinany.

1. L'objectif est de prédire la production d'énergie (solaire ou éolienne) à partir des variables climatiques.

2. 3.6. Test de significativité (p-value)

La statistique de test est :

$$t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}$$

avec :

- $n = 12$ mois

$$t \approx 0,06$$

La p-value obtenue est :

$$p = 0,95$$

Donc :

Pour : $p > 0,05$: la corrélation est non significative statistiquement.

Ainsi, la variabilité de l'irradiation solaire dans la région Fitovinany n'est pratiquement pas expliquée par les variations mensuelles de pluie. Les précipitations ne constituent donc pas un facteur prédictif pertinent pour estimer le potentiel solaire mensuel.

- D'autres paramètres climatiques (nébulosité, humidité relative, couverture nuageuse, aérosols atmosphériques) jouent probablement un rôle plus déterminant.

3.7. Variables

- Les Variables dépendantes Y : Production d'énergie (kWh/m²/j pour solaire, ou kWh estimé pour éolien)
- Les Variables indépendantes X_i comprennent respectivement :
 - X_1 = Ensoleillement (kWh/m²/j)
 - X_2 = Température maximale (°C)
 - X_3 = Précipitation (mm)
 - X_4 = Vent (km/h)

Formule générale :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \varepsilon$$

- β_0 : constante (interception)
- $\beta_1 \dots \beta_4$: coefficients indiquant l'impact de chaque variable
- ε : erreur aléatoire

L'application des données récoltées au niveau de la Région Fitovinany avec la formule générale permet d'avoir **Y** : la production solaire théorique en kWh/m²/jour.

Le tableau 3 informe la relation entre les variables dépendantes et indépendantes

Mois	Ensoleillement (kWh/m ² /j) (X1)	Tmax (°C) (X2)	Précipitation (mm) (X3)	Vent (km/h) (X4)	Production solaire (kWh/m ² /j) (Y)
Janv	5,71	29	156	6	3,38
Fév	5,43	30	210	5,5	2,57
Mars	5,14	28	198	5,5	2,77
Avr	4,7	27	118	4,3	3,01
Mai	4,05	25	125	4,01	2,46
Juin	3,71	23	121	3,32	2,11
Juil	3,8	24	95	4,5	2,57
Août	4,7	25	85	5,27	3,42
Sept	5,65	26	83	6,12	4,49
Oct	5,98	28	82	6,54	4,84
Nov	5,97	30	134	5,98	3,85
Déc	5,97	28	134	5,97	3,63

En application de la régression multiple pour prédire la production d'énergie en fonction des conditions climatiques en faisant les actions suivantes :

- En introduisant les données climatiques mensuelles dans la Région Fitovinany ;
- En ajustant les coefficients β_i pour optimiser la prédiction ;
- En prévoyant la production énergétique saisonnière pour chaque type d'énergie.

Le tableau 3 de production solaire estimée (kWh/m²/j) montre que :

- La Production solaire **la plus faible** : février (2,57 kWh/m²/j) : saison des pluies, fortes précipitations.
- La Production solaire **la plus élevée** : octobre (4,84 kWh/m²/j) : saison sèche, ensoleillement optimal.

Ces résultats obtenus permettent de planifier le **stockage d'énergie ou complément d'énergie** selon la saison.

La figure 7 montre le graphique visuel (ligne) montrant la production solaire estimée pour chaque mois.



Figure 7 : Graphique visuel (ligne) de production solaire estimée par mois

4. Discussion

Le coefficient de corrélation de Pearson calculé entre les précipitations et l'irradiation solaire à Manakara est $r = 0,02$ avec une p-value de 0,95. Cette valeur indique l'absence de relation linéaire significative entre les deux variables sur l'échelle mensuelle. Ainsi, l'irradiation solaire dans la région étudiée ne dépend pas directement des cumuls pluviométriques mensuels, ce qui confirme l'intérêt d'une diversification énergétique intégrant à la fois le solaire et l'hydroélectricité.

2.1 4.1 Influence de la variabilité saisonnière sur l'hydroélectricité

Les analyses montrent que la production hydroélectrique est fortement corrélée aux cumuls pluviométriques mensuels et au débit des bassins versants locaux (notamment les bassins associés aux fleuves côtiers de la région sud-est). Durant la saison des pluies, l'augmentation des débits entraîne une hausse significative de la production électrique. En revanche, les périodes sèches provoquent une réduction du niveau des retenues, limitant la capacité de production.

Ce constat rejoint les travaux du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC), qui soulignent que la production hydroélectrique dans les régions tropicales est particulièrement sensible aux variations interannuelles des précipitations. De même, l'International Renewable Energy Agency [6] indique que dans les pays en développement à forte dépendance hydroélectrique, les sécheresses prolongées constituent un facteur majeur de vulnérabilité énergétique.

Dans le cas spécifique de Fitovinany, les épisodes de déficit pluviométrique observés lors des années marquées par des phénomènes de type El Niño ont entraîné une baisse notable du potentiel hydroélectrique [7], confirmant la dépendance directe entre disponibilité hydrique et production.

2.2 4.2 Production solaire et variabilité climatique

Contrairement à l'hydroélectricité, la production solaire photovoltaïque montre une dynamique inversement liée à la pluviométrie. Les périodes sèches, caractérisées par une couverture nuageuse réduite et une irradiation plus stable, favorisent une production plus régulière.

Cependant, dans les régions côtières de l'Est malgache, l'humidité atmosphérique élevée et la nébulosité persistante pendant la saison des pluies peuvent réduire significativement le rendement des modules photovoltaïques. Les résultats confirment les conclusions de l'International Energy Agency, selon lesquelles la variabilité saisonnière de l'irradiation solaire peut provoquer des fluctuations de production allant de 10 à 30 % selon les zones tropicales humides.

Ainsi, bien que le solaire soit moins dépendant des précipitations que l'hydroélectricité, il reste influencé par les conditions atmosphériques locales (nuages, humidité, températures élevées).

2.3 4.3 Complémentarité saisonnière des ressources

L'un des résultats majeurs de cette étude est la mise en évidence d'une complémentarité saisonnière entre hydroélectricité et solaire photovoltaïque :

- Saison humide correspond à une forte production hydroélectrique, production solaire modérée
- Saison sèche correspond aussi à une baisse hydroélectrique mais une meilleure performance solaire

Ce mécanisme de compensation partielle renforce la résilience du système énergétique régional. Cette complémentarité est largement documentée dans la littérature scientifique internationale sur les systèmes hybrides hydro-solaire (IRENA, 2020 ; IEA, 2022).

Dans le contexte de Fitovinany, cette synergie pourrait constituer un levier stratégique pour :

- réduire la dépendance aux générateurs thermiques,
- améliorer la stabilité du réseau,
- renforcer la sécurité énergétique régionale.

2.4 4.4 Vulnérabilité face aux anomalies climatiques

Les années marquées par des anomalies climatiques (sécheresses prolongées ou précipitations extrêmes associées aux cyclones tropicaux fréquents dans le Sud-Est malgache) révèlent une vulnérabilité structurelle du système énergétique local.

Les sécheresses réduisent simultanément :

- les débits hydrologiques,
- la recharge des nappes,
- la capacité de stockage des retenues.

À l'inverse, les fortes précipitations extrêmes peuvent endommager les infrastructures hydroélectriques (érosion, ensablement, crues soudaines). Le Banque mondiale souligne que Madagascar fait partie des pays africains les plus exposés aux risques climatiques, ce qui affecte directement les infrastructures énergétiques.

La modélisation statistique développée dans cette étude (régression multiple / analyse de corrélation) constitue donc un outil pertinent pour :

- anticiper les périodes critiques,
- optimiser la planification énergétique,
- développer des stratégies d'adaptation.

2.5 4.5 Apport de la modélisation pour la planification énergétique

Le modèle établi permet :

- d'estimer la production énergétique en fonction des variables climatiques (pluie, irradiation, température).
- d'identifier les seuils critiques de précipitations en dessous desquels la production hydroélectrique devient insuffisante.
- de simuler des scénarios climatiques futurs.

Cette approche rejoint les recommandations méthodologiques de l'IPCC concernant l'intégration des projections climatiques dans la planification énergétique nationale.

Pour la région Fitovinany, l'intégration d'un système hybride couplé à des solutions de stockage (batteries ou micro-réseaux intelligents) apparaît comme une stratégie d'adaptation pertinente face aux fluctuations climatiques futures.

5. Conclusion

Cette étude a permis d'analyser la variabilité saisonnière des paramètres climatiques et d'évaluer leur influence sur le potentiel des énergies renouvelables dans la Région Fitovinany à Madagascar. Les résultats mettent en évidence une forte variabilité saisonnière caractérisée par une période humide marquée par des précipitations élevées et un ensoleillement réduit, et une période sèche caractérisée par une diminution des précipitations, un ensoleillement plus important et une intensification relative du vent. Cette dynamique climatique influence directement les conditions de production des différentes sources d'énergie renouvelable.

L'analyse de corrélation a montré que la relation entre les précipitations et l'irradiation solaire est très faible ($r = 0,02$) et statistiquement non significative ($p = 0,95$), ce qui indique que les variations de pluie n'expliquent pratiquement pas la variabilité de l'irradiation solaire. Le coefficient de détermination ($R^2 = 0,0004$) confirme que la précipitation n'est pas un facteur explicatif majeur du potentiel solaire mensuel. La modélisation par régression multiple a toutefois permis d'estimer la production solaire mensuelle et de mettre en évidence une production plus élevée durant la saison sèche, notamment au mois d'octobre, et plus faible durant la saison des pluies.

Ces résultats s'inscrivent dans le contexte énergétique national où Madagascar dispose d'un potentiel solaire particulièrement favorable, avec un rayonnement moyen d'environ 4,5 à 6 kWh/m²/jour et plus de 2 600 à 3 000 heures d'ensoleillement par an, ce qui représente une opportunité importante pour le développement de systèmes photovoltaïques et de solutions énergétiques durables.

L'ensemble des résultats suggère que la mise en place d'un système énergétique hybride combinant énergie solaire, hydroélectricité et énergie éolienne pourrait permettre de compenser les fluctuations saisonnières des ressources climatiques et d'assurer une production énergétique plus stable dans la région Fitovinany.

Cependant, cette étude présente certaines limites liées notamment à l'utilisation d'un nombre restreint de variables climatiques et à l'analyse basée sur des données mensuelles. Des travaux futurs pourraient intégrer d'autres paramètres atmosphériques tels que la nébulosité, l'humidité relative ou la couverture nuageuse, ainsi que des séries temporelles sur plusieurs années afin d'améliorer la précision des modèles de prédiction et de mieux comprendre l'impact de la variabilité climatique sur le potentiel énergétique régional.

Références

- [1]. GIEC (2022) *Sixième rapport d'évaluation : Impacts, adaptation et vulnérabilité*. Genève: Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
- [2]. Banque mondiale (2021). *Madagascar Climate Risk Profile*
- [3]. Banque mondiale (2020) *Madagascar : Diagnostic du secteur de l'énergie*. Washington DC: World Bank
- [4]. Direction Générale de la Météorologie (2020) *Rapport climatologique annuel de Madagascar*. Antananarivo: DGM
- [5]. IRENA (2019) *Renewable energy and climate change*. Abu Dhabi: IRENA
- [6]. IEA (2021) *Renewables 2021*. Paris: International Energy Agency
- [7]. Rakotoarisoa, J., Randriamaherijaona, M. & Ravelomanantsoa, N. (2018) 'Analyse du potentiel des énergies renouvelables à Madagascar', *Revue malgache de géographie*, 12(2), pp. 45–60.