

Corrélation Des Variables Climatiques, Rendement Agricole Et Utilisation D'Engrais Chimiques à Mahereza Madagascar

[Correlation of Climatic Variables, Crop Yield and Use of Chemical Fertilizers in Mahereza Madagascar]

Iriela RAKOTOMALALA¹ and Laurent RAMAMBASON²

^{1,2} Université FJKM Ravelojaona, 101 Antananarivo-Madagascar

Ecole Doctorale Sciences Interpstemologiques, 101 Antananarivo-Madagascar



Résumé: Cette étude analyse les corrélations entre variations climatiques, rendements agricoles et usage des produits chimiques agricoles dans la commune de Mahereza (Madagascar) sur une période de 30 ans (1992-2022). L'objectif est d'identifier les impacts du changement climatique et de l'utilisation des engrais chimiques sur l'agriculture de la zone d'étude. Pour ce faire, des outils comme l'analyse de corrélation de Pearson, le modèle AutoRegressive Integrated Moving Average ou ARIMA, l'Analyse en Composantes Principales, la Classification Ascendante Hiérarchique et les méthodes de Wilks sont appliqués. Les données utilisées incluent les données climatiques (températures et précipitations), les rendements agricoles et les quantités d'intrants chimiques de la zone. Les résultats montrent que les variations climatiques (hausse des températures et irrégularité des précipitations) exercent des pressions significatives sur le système agricole de Mahereza. Face à ces pressions et à la croissance démographique, les agriculteurs optent pour l'utilisation d'engrais chimiques pour intensifier leurs rendements. Mais cette pratique engendre des conséquences environnementales et économiques néfastes importantes sur le long terme. Cette étude recommande alors des stratégies d'adaptation, telles que l'agroécologie et la gestion durable des ressources, pour réduire la vulnérabilité des agriculteurs.

Mots-clés : Impacts du changement climatique, Mahereza, Agriculture durable, Système agricole

Abstract: This study analyzes the correlations between climatic variations, agricultural yields and the use of agricultural chemicals in the commune of Mahereza (Madagascar) over a 30-year period (1992-2022). The aim is to identify the impacts of climate change and the use of chemical fertilizers on agriculture in the study area. To achieve this, tools such as Pearson correlation analysis, the AutoRegressive Integrated Moving Average or ARIMA model, Principal Component Analysis, Hierarchical Ascending Classification and Wilks' methods were applied. The data used include climatic data (temperature and rainfall), crop yields and quantities of chemical inputs in the area. The results show that climatic variations (rising temperatures and irregular rainfall) are exerting significant pressure on the Mahereza farming system. Faced with these pressures and population growth, farmers are opting to use chemical fertilizers to boost their yields. However, this practice has significant negative long-term environmental and economic consequences. This study recommends adaptation strategies, such as agroecology and sustainable resource management, to reduce farmers' vulnerability.

Keywords: Climate change impacts, Mahereza, Sustainable farming, Farming system.

I. INTRODUCTION

Le changement climatique engendre des impacts majeurs sur les écosystèmes [1], la santé, les ressources naturelles [2], l'économie [3] et les sociétés humaines [4]. L'augmentation des températures, l'élévation du niveau de la mer et les événements climatiques extrêmes provoquent des perturbations écologiques et sociales partout dans le monde [5]. Les impacts du changement climatique sur l'agriculture sont aujourd'hui largement documentés, notamment dans les régions tropicales où les systèmes agricoles sont fortement dépendants des conditions climatiques [6] [7]. La commune de Mahereza, à Madagascar, est un exemple représentatif de cette situation. À travers une riziculture pluviale, les agriculteurs locaux font face à des variations climatiques importantes. Ces aléas affectent les rendements agricoles, perturbent les cycles de culture traditionnels et menacent la sécurité alimentaire [8].

Les agriculteurs de Mahereza recourent aux engrais chimiques et pesticides pour répondre à la variabilité climatique, la dégradation des sols et les ravageurs de culture. Cependant, l'utilisation intensive de ces intrants favorise la dégradation des sols ferralitiques, pauvres en matière organique [9], et la pollution des ressources hydriques par ruissellement. La hausse constante des coûts des intrants chimiques impose une charge financière accrue, limitant leur accessibilité aux ménages vulnérables. Ces pratiques soulèvent des questions critiques sur leur durabilité, en raison des impacts environnementaux et économiques combinés [10].

Cette étude a pour objectif principal d'analyser les relations entre les variations climatiques, les rendements agricoles et l'usage des produits chimiques à Mahereza. Les objectifs spécifiques incluent :

- L'identification des tendances climatiques locales et de leurs impacts sur l'agriculture.
- L'examen des corrélations entre les pratiques agricoles, les rendements et les variations climatiques.
- La proposition des stratégies d'adaptation pour une agriculture durable dans ce contexte vulnérable.

II. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1. Zone d'étude

La commune rurale de Mahereza se trouve dans le district d'Ambohidratrimo [11] dont les coordonnées géographiques sont X= 496 749 m et Y= 800 703 m. La commune se situe à 11 km de la ville d'Antananarivo et est étalée sur une superficie totale de 1320,52 ha. La Figure 1 illustre la localisation de Mahereza.

Les activités agricoles dominent largement dans la commune, constituant la principale source de revenus pour la population locale [12].

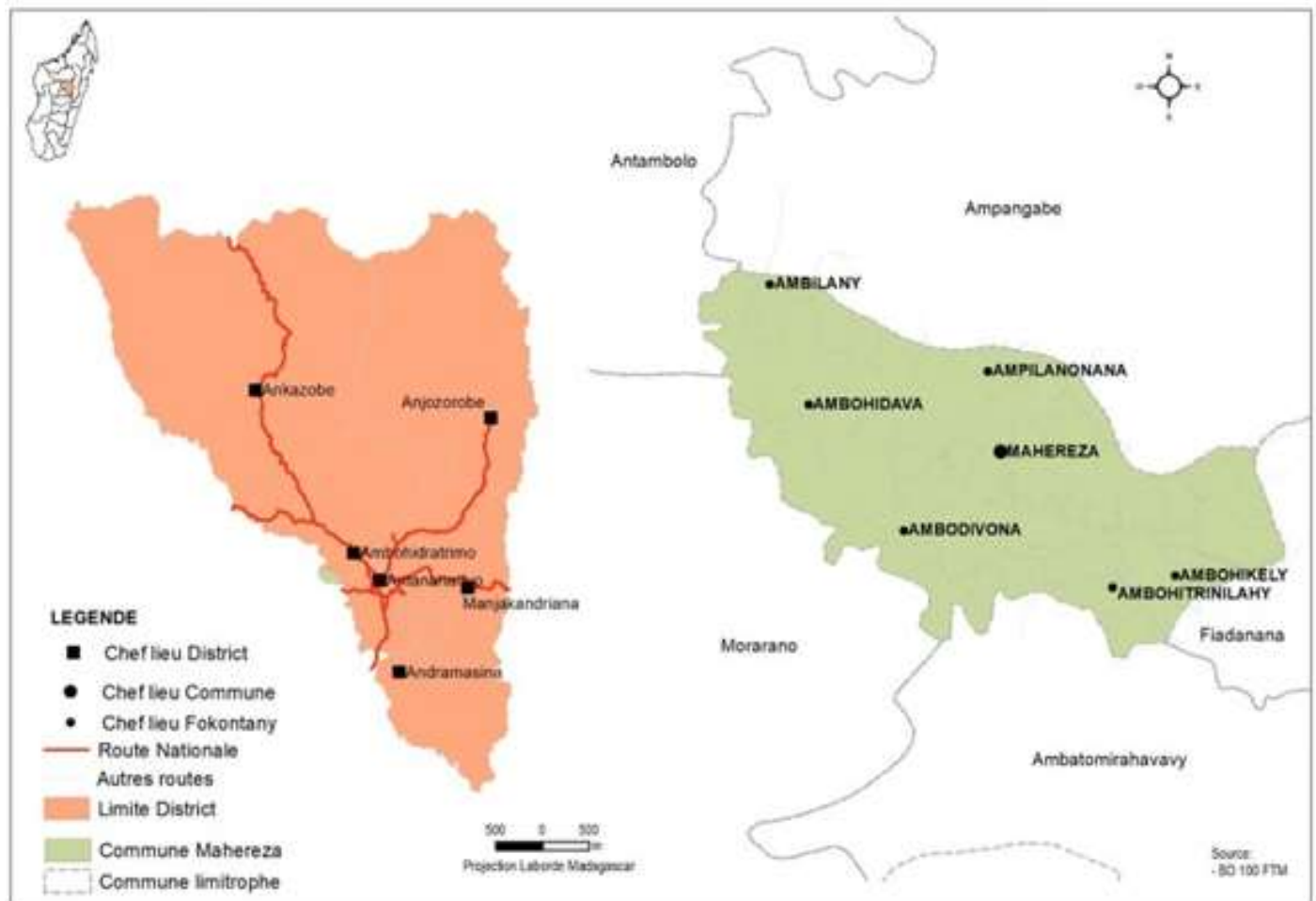


Figure 1: Localisation de la zone d'étude

2.2. Données utilisées

Afin de bien mener cette étude, des données, s'étalant sur trente ans (soit de 1992 à 2022), ont été récoltées et analysées. Les détails sur ces données sont présentés dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Données utilisées dans cette étude

Type de données	Période	Sources	Contenu	Objectifs d'analyse
Données climatiques	1992 - 2022 (30 ans)	Stations météorologiques du district d'Ambohidratrimo	Température moyenne annuelle, précipitations annuelles.	Évaluer l'évolution des paramètres climatiques et leur impact sur les pratiques agricoles.
Rendements rizicoles	1992 - 2022 (30 ans)	Rapports du ministère de l'Agriculture, relevés communautaires	Production totale de riz (tonnes/hectare), évolution des rendements selon pratiques agricoles et climat.	Analyser l'impact des changements climatiques et des pratiques agricoles sur la productivité rizicole.
Quantités de produits chimiques	1992 - 2022 (30 ans)	Enquêtes auprès des agriculteurs, rapports du ministère de l'Agriculture	Quantités annuelles de fertilisants, pesticides, types de produits utilisés (engrais, herbicides, pesticides).	Évaluer les effets des intrants agricoles sur les rendements et les émissions de gaz à effet de serre (GES).

2.3. Méthodes d'analyse

Cinq méthodes statistiques ont été mises en œuvre pour exploiter les données climatiques et agricoles, chacune contribuant à répondre aux objectifs spécifiques de l'étude.

2.3.1. Analyse de Corrélation de Pearson

C'est une méthode statistique utilisée pour mesurer l'existence (donnée par une valeur p) et la force (donnée par le coefficient de corrélation r entre -1 et $+1$) d'une relation linéaire entre deux variables quantitatives [13]. Un coefficient $r=1$ indique une relation linéaire positive parfaite, où une augmentation de l'une des variables s'accompagne d'une augmentation proportionnelle de l'autre. À l'inverse, un coefficient $r=-1$ reflète une relation linéaire négative parfaite, signifiant que lorsque l'une des variables augmente, l'autre diminue proportionnellement. Enfin, un coefficient $r=0$ traduit l'absence de relation linéaire entre les deux variables, ce qui implique qu'aucun lien direct n'est observable.

Dans le cadre de cette étude, cette méthode a été employée pour examiner les relations linéaires entre les variables climatiques (température et précipitations) et les rendements agricoles. Elle a également servi à évaluer l'impact de l'utilisation de produits chimiques sur la productivité des cultures.

2.3.2. Modèle ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average)

Le modèle ARIMA est une méthode statistique largement utilisée pour analyser et prévoir des séries temporelles [14]. Il combine trois composants principaux : l'autocorrélation (AR), la différenciation (I) et la moyenne mobile (MA), ce qui lui permet de capturer les tendances, les cycles et les fluctuations dans une série temporelle [15].

Le modèle ARIMA a été utilisé pour prévoir les tendances climatiques, notamment l'évolution de la température dans 10 ans. Basé sur les données climatiques des 30 dernières années, il prend en compte les tendances et les fluctuations observées pour faciliter une meilleure planification des pratiques agricoles.

2.3.3. *Analyse en Composantes Principales (ACP)*

L'ACP est une méthode statistique utilisée pour réduire la dimensionnalité des données tout en maximisant l'information retenue [16]. Elle transforme les variables initiales corrélées en composantes principales non corrélées, ordonnées par variance expliquée. Cette approche identifie les facteurs (axes ou composantes principales) dominants influençant la variabilité et élimine la redondance dans les données. Elle repose sur la décomposition en valeurs propres et vecteurs propres de la matrice de covariance ou de corrélation. Les composantes principales sont interprétées et visualisées pour simplifier l'analyse, tout en préservant une proportion significative de la variance [17].

Dans cette étude, l'ACP a été appliquée pour réduire la complexité des données en identifiant les facteurs principaux influençant les rendements agricoles, pour simplifier l'interprétation des résultats tout en conservant une vue d'ensemble cohérente.

2.3.4. *Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)*

La CAH est une méthode statistique de regroupement basée sur la similarité entre observations [18]. Elle construit une hiérarchie de clusters, représentée par un dendrogramme, en fusionnant progressivement des groupes selon leur proximité [19]. Les distances entre observations sont calculées à l'aide de mesures spécifiques, comme la distance euclidienne. Différents critères de liaison (simple, complète, moyenne) déterminent comment les clusters sont formés. La CAH permet d'identifier des structures cachées dans les données, sans nécessiter un nombre préétabli de groupes. Elle est utile pour analyser des données complexes, malgré sa sensibilité aux valeurs aberrantes.

La CAH a servi à regrouper les régimes pluviométriques de la commune en classes homogènes afin d'identifier les périodes de précipitations similaires et d'offrir des pistes d'adaptation pour les pratiques agricoles locales.

2.3.5. *Évaluation des modèles multivariés (Wilks' Lambda)*

Wilks' Lambda est une statistique multivariée mesurant la variance inexpliquée par les effets d'un modèle sur plusieurs variables dépendantes [20]. Utilisée principalement en MANOVA et en analyse discriminante, elle teste si les moyennes vectorielles des groupes diffèrent significativement. La statistique, comprise entre 0 et 1, évalue l'importance des différences intergroupes. Une valeur proche de 0 indique des différences significatives, tandis qu'une valeur proche de 1 suggère l'absence d'effet notable [21].

Les méthodes avancées proposées par Wilks ont été utilisées pour tester la robustesse et l'adéquation des modèles multivariés appliqués. Le but de leur utilisation est de déterminer l'importance relative des différentes variables dans l'analyse des rendements agricoles, garantissant la fiabilité des résultats obtenus.

Ces différentes méthodes combinées permettent :

- D'analyser les relations entre les variations climatiques et les rendements agricoles.
- D'identifier les facteurs déterminants influençant ces rendements.
- De classer les régimes pluviométriques pour une meilleure adaptation des pratiques agricoles face aux défis climatiques.

III. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. Variations des températures et des précipitations moyennes

La Figure 2 présente l'évolution des précipitations moyennes (en orange) et des températures moyennes (en bleu) à Mahereza entre 1990 et 2025.

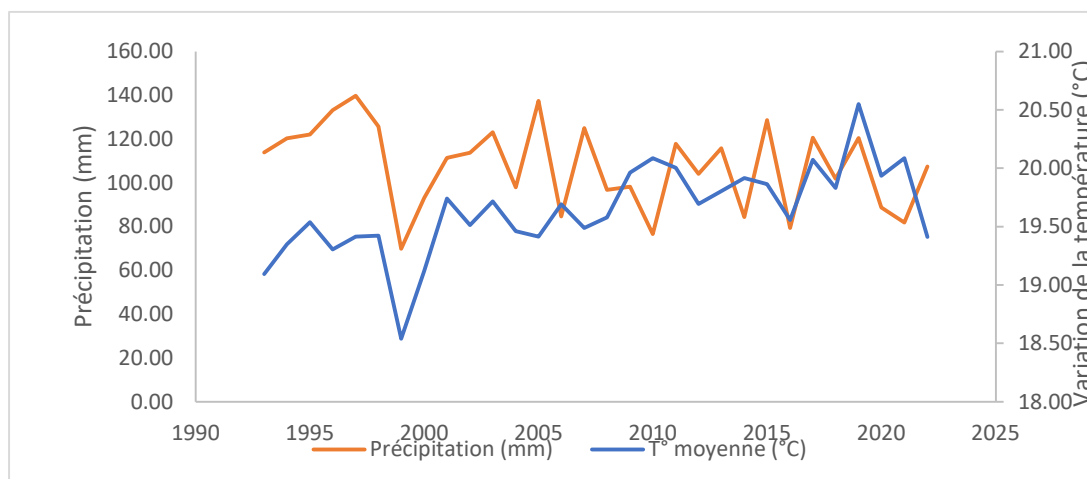


Figure 2 : Variation des températures et des précipitations moyennes

Cette Figure 2 permet d'identifier les tendances climatiques sur la période étudiée et leurs éventuelles implications pour les activités agricoles. Il peut être observé que les précipitations montrent une variabilité importante avant 2010, suivie d'une stabilisation relative avec des variations plus modérées après. Les températures restent globalement stables, variant entre 18,5 °C et 21 °C, avec une légère tendance à l'augmentation récente. Une corrélation inverse modérée est observée : certaines années de forte température (2005, 2015) sont accompagnées de fortes pluies, tandis que d'autres années avec des températures plus basses (1999, 2003) ont également vu des niveaux de précipitation plus faibles. Après 2010, les variations des deux variables semblent synchrones, suggérant un possible couplage climatique plus marqué. Ces résultats suggèrent qu'une augmentation des températures pourrait entraîner des pluies plus intenses, pouvant impacter directement l'agriculture de la commune de Mahereza.

Ces résultats montrent également que la Commune rurale de Mahereza connaît des précipitations irrégulières croissantes, particulièrement durant la saison des pluies, rendant l'agriculture vulnérable. Des études en Afrique subsaharienne [22] révèlent une tendance climatique similaire : une intensification des sécheresses prolongées suivies de pluies intenses, perturbant l'agriculture. Par ailleurs, Zhang *et al.* (2016) [23] ont observé une variation accrue des précipitations en Afrique de l'Est, augmentant la pression sur les ressources hydriques.

Par conséquent, adopter des stratégies comme la rétention d'eau et l'irrigation durable est une nécessité pour sécuriser les rendements agricoles locaux. Une gestion efficace des ressources hydriques renforce la résilience des systèmes agricoles pluviaux face aux changements climatiques.

3.2. Tendances Thermométriques et Prédictions de Température

Une prédiction de la température moyenne pour les 10 prochaines années a été réalisée en utilisant le modèle ARIMA. Les résultats sont présentés sur la Figure 3.

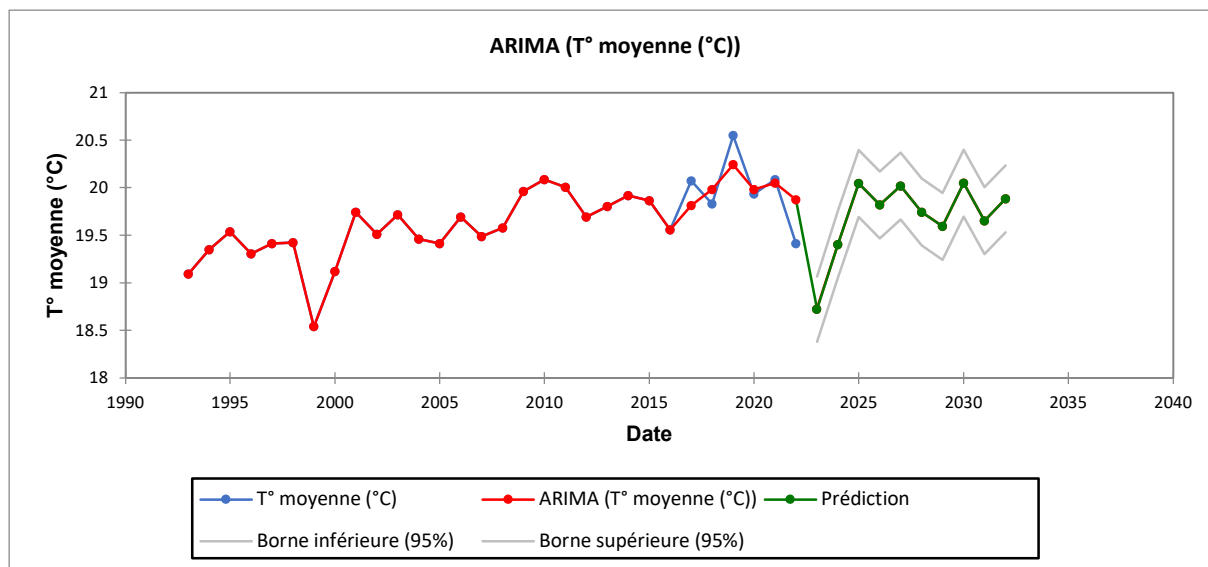


Figure 3: Prédiction de la température moyenne

La Figure 3 illustre l'évolution des températures moyennes annuelles de 1990 à 2035, avec des prévisions basées sur le modèle ARIMA. Les températures observées (1990-2022, ligne bleue) montrent une hausse globale, bien qu'avec des variations notables, comme une baisse en 1997. Le modèle ARIMA (ligne rouge) capte ces tendances et anticipe des températures stables autour de 19,5°C à 20°C pour 2023-2035. Les écarts entre les observations et les prédictions pour 2020-2022 sont faibles, témoignant d'une bonne précision du modèle. Les bandes d'incertitude (zones grises) montrent une marge probable entre 19°C et 20,5°C, mais leur élargissement après 2025 reflète une diminution de la fiabilité des prévisions à long terme (ce qui est typique des modèles ARIMA). Les résultats suggèrent une très légère tendance générale à la hausse des températures. Une stabilité relative des températures est prédite, sans indication de fluctuations majeures ou de tendances marquées à la hausse ou à la baisse. Cela suppose une série stationnaire qui explique l'absence de tendance marquée dans les prédictions et reflète une hypothèse de stabilité climatique.

Cette prévision de hausse des températures concorde avec le rapport de l'IPCC AR6 (ou Intergovernmental Panel on Climate Change Sixth Assessment Report) [24] qui rapporte que les températures en Afrique subsaharienne devraient augmenter de 2 à 4 °C d'ici 2050 si aucune adaptation climatique significative n'est mise en œuvre. Cela accentue les défis agricoles liés à la disponibilité en eau et à la santé du sol. D'ailleurs, Lobell *et al.* (2008) [25] et Sylla *et al.* (2016) [26] ont démontré que des augmentations de températures, même modestes, peuvent aggraver les périodes de sécheresse et réduire les rendements agricoles.

Les résultats de l'étude soulignent l'urgence de développer des stratégies d'adaptation pour atténuer les impacts de la tendance thermique croissante. Trois axes majeurs d'intervention sont proposés :

- **Développement des variétés culturales résistantes à la chaleur** : concevoir des semences adaptées aux températures élevées pour limiter les pertes de rendement.
- **Promotion des pratiques agricoles durables** : encourager le paillage, l'agroforesterie et l'enrichissement organique pour préserver la fertilité des sols et réduire l'évaporation.
- **Investissement dans des technologies adaptées** : mettre en œuvre des systèmes d'irrigation goutte à goutte afin de maintenir la productivité agricole face aux périodes de stress hydrique.

3.3. Classification des régimes pluviométriques

Les Figures 4 et 5 présentent les résultats de l'analyse des régimes de précipitation mensuels obtenus par l'application de la CAH.

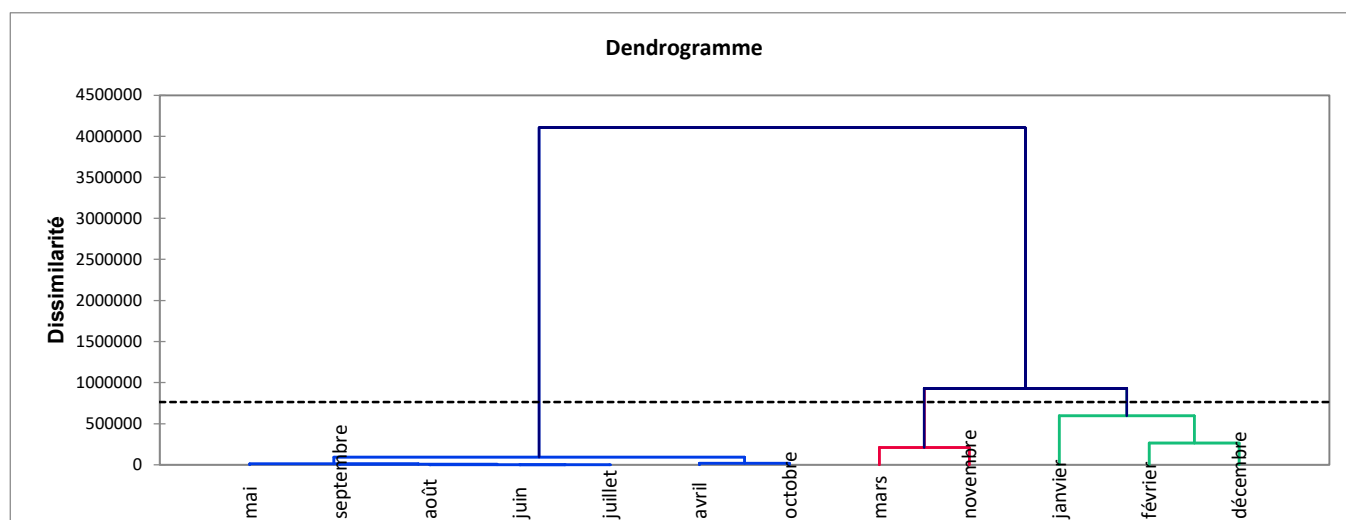


Figure 4 : Dendrogramme de la pluviométrie mensuelle

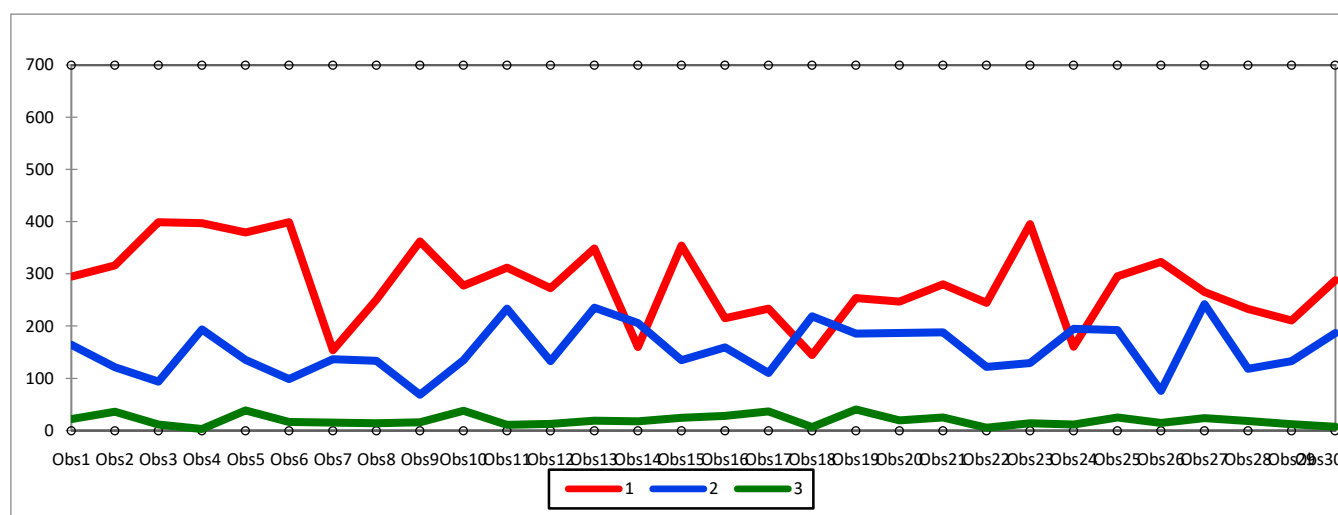


Figure 5 : Évolution des distances au barycentre des précipitations mensuelles par classe

L'analyse des régimes pluviométriques mensuels (Figure 4) révèle trois groupes principaux de mois en fonction de leurs précipitations :

- Saison des pluies (janvier, décembre, novembre, février) : Ce groupe est caractérisé par des précipitations élevées (125 mm à près de 300 mm), favorables à l'agriculture mais pouvant engendrer des risques d'inondation. Par exemple, janvier affiche une moyenne de 297,5 mm.
- Période de transition (mars, avril, octobre) : Ces mois présentent des précipitations modérées (44 mm à 185 mm), indiquant une transition entre les saisons des pluies et sèches. Bien que suffisantes pour certaines cultures, elles ne garantissent pas une disponibilité d'eau abondante.
- Saison sèche (mai à septembre) : Ce groupe comprend des mois avec des précipitations très faibles, souvent inférieures à

20 mm, rendant cette période peu propice aux cultures exigeantes en eau et nécessitant des stratégies d'adaptation pour la gestion des ressources en eau.

L'analyse des distances au barycentre des précipitations (Figure 5) a permis de classer les mois selon la variabilité de leurs précipitations. La Classe 1 (fortes pluies) présente une grande variabilité, tandis que la Classe 2 (transition) montre une certaine homogénéité, et la Classe 3 (sèche) est très homogène avec une faible variance.

Il y a alors une forte saisonnalité avec des précipitations concentrées au début et à la fin de l'année, et un creux significatif entre mars et septembre. Traoré (2022) [27] a identifié un schéma similaire en Afrique de l'Ouest, où les périodes de déficit hydrique inter-saisonnières ont entraîné des baisses significatives des rendements des cultures. Cette situation pouvant aggraver l'instabilité de la sécurité alimentaire [28] et la dégradation des terres agricoles [29], il est plus que crucial de mettre au point des stratégies adaptées de gestion des eaux et de restructuration du système agricole. Il est essentiel de privilégier l'introduction de cultures pluviales adaptées, telles que des variétés résistantes aux déficits hydriques, comme le riz hybride, pour maximiser la productivité face à des précipitations irrégulières. L'intégration de rotations culturales avec des légumineuses est également recommandée, car elles résistent bien aux variations hydriques tout en améliorant la fertilité des sols grâce à leur capacité à fixer l'azote. Par ailleurs, l'amélioration des infrastructures hydriques doit être une priorité : la construction de retenues collinaires et de systèmes de récupération des eaux pluviales permettrait de mieux gérer les excès de précipitations en début et fin d'année, tout en offrant des ressources en eau durant les périodes de déficit.

3.4. Corrélations entre les variables

Dans cette étude, plusieurs variables climatiques, agricoles et socio-économiques ont été analysées afin de mieux comprendre leurs interactions et leurs impacts sur les rendements rizicoles. Le Tableau 2 présente les coefficients de corrélation de Pearson entre ces différentes variables, incluant les températures (moyenne, maximale et minimale), les précipitations, la croissance démographique, les rendements rizicoles, ainsi que l'utilisation de produits chimiques tels que les engrais et les pesticides. L'analyse de ces corrélations vise à évaluer leur contribution potentielle à la durabilité des systèmes agricoles et à informer les réponses agroécologiques.

Tableau 2: Coefficients de corrélation de Pearson des variables

Variables	Température moyenne	Température max	Températures min	Précipitation	Croissance démographique	Rendement	Engrais	Pesticide
Température moyenne	1	0,932	0,911	0,004	0,677	0,276	0,249	0,708
Température max	0,932	1	0,698	-0,041	0,565	0,262	0,171	0,613
Température min	0,911	0,698	1	0,056	0,691	0,245	0,296	0,697
Précipitation	0,004	-0,04	0,056	1	-0,322	-0,303	-0,228	-0,309
Croissance démographique	0,677	0,565	0,691	-0,322	1	0,687	0,664	0,981
Rendement	0,276	0,262	0,245	-0,303	0,687	1	0,694	0,650
Engrais	0,249	0,171	0,296	-0,228	0,664	0,694	1	0,577
Pesticide	0,708	0,613	0,697	-0,309	0,981	0,650	0,577	1

Sur ce Tableau 2, des corrélations positives fortes entre des variables sont constatées :

- **Température moyenne et Température max ($r = 0,932$)** : Cette corrélation très forte positive indique que lorsque la température moyenne augmente, la température maximale a également tendance à augmenter. Cela est attendu, car les températures maximales et moyennes sont généralement liées.
- **Température moyenne et Température min ($r = 0,911$)** : Une autre forte corrélation positive, suggérant que des températures moyennes plus élevées sont également associées à des températures minimales plus élevées.
- **Croissance démographique et Pesticide ($r = 0,981$)** : Cette corrélation extrêmement forte et positive signifie que l'augmentation de la population est fortement associée à une utilisation accrue de pesticides. Cela pourrait indiquer que des pratiques agricoles intensifiées sont mises en place pour répondre à la demande alimentaire croissante.
- **Croissance démographique et Engrais ($r = 0,664$)** : Une forte corrélation positive qui indique que l'augmentation de la population est également liée à une augmentation de l'utilisation d'engrais, suggérant que des pratiques agricoles intensifiées sont nécessaires pour soutenir une population croissante.
- **Rendement et Engrais ($r = 0,694$)** : Cette forte corrélation positive indique que l'utilisation d'engrais est associée à des rendements agricoles plus élevés, ce qui est cohérent avec les pratiques agricoles où l'apport en nutriments est crucial pour la production.
- **Rendement et Pesticide ($r = 0,650$)** : Une corrélation positive forte qui indique que l'utilisation de pesticides est également liée à des rendements agricoles plus élevés. Cela peut refléter des pratiques visant à protéger les cultures contre les ravageurs.

Certaines variables présentent des corrélations positives modérées entre elles :

- **Température moyenne et Croissance démographique ($r = 0,677$)** : Une corrélation positive modérée qui montre que des températures moyennes plus élevées sont liées à une plus grande croissance démographique, ce qui pourrait indiquer des conditions plus favorables pour la vie humaine et l'agriculture.
- **Température minimale et Croissance démographique ($r = 0,691$)** : Une corrélation positive modérée, indiquant que des températures minimales plus élevées sont également associées à une croissance démographique accrue.

Des corrélations négatives peuvent également être constatées :

- **Précipitation et Croissance démographique ($r = -0,322$)** : Une corrélation négative qui suggère qu'une augmentation des précipitations pourrait être associée à une croissance démographique plus faible. Cela pourrait être interprété dans le contexte de la disponibilité des terres agricoles ou des conditions de vie.
- **Précipitation et Rendement ($r = -0,303$)** : Cela indique que des niveaux de précipitations plus élevés pourraient être associés à des rendements plus faibles, ce qui peut être dû à des inondations ou à des conditions défavorables pour certaines cultures.

Et enfin, il y a des corrélations à faible impact :

- Les corrélations entre **Rendement** et les variables de **Température** (valeurs de r autour de 0,2-0,3) sont relativement faibles, indiquant qu'il n'y a pas de relation forte entre ces variables, ce qui pourrait nécessiter une exploration plus approfondie pour comprendre d'autres facteurs influents.

D'une part, l'analyse des corrélations montre des corrélations négatives entre la précipitation et certaines variables. Cela suggère que des conditions climatiques extrêmes pourraient avoir des impacts défavorables sur l'agriculture.

D'autre part, l'analyse des corrélations met en évidence des relations significatives entre les variables climatiques, démographiques et les intrants agricoles. Les corrélations fortes entre la croissance démographique et l'utilisation de pesticides et d'engrais soulignent

l'importance de la gestion agricole dans un contexte de population croissante. L'utilisation d'intrants chimiques est adoptée par plusieurs pays, comme le Malawi et l'Éthiopie, pour répondre aux besoins croissants de la population [30]. Mais sur le long terme, cette pratique a des conséquences néfastes [31]. Pretty et Bharucha (2015) [32] ont mis en garde contre les effets à long terme de l'utilisation incontrôlée d'intrants chimiques, qui peuvent réduire la capacité des sols à stocker du carbone, augmentant ainsi la vulnérabilité des systèmes agricoles face au changement climatique.

Pour minimiser les impacts de l'intensification chimique, des mesures d'encadrement et d'accompagnement des agriculteurs sont nécessaires. La promotion de l'agroécologie, avec des alternatives comme les engrais organiques et le compostage, pourrait réduire la dépendance aux intrants chimiques tout en améliorant la santé des sols. Des campagnes de sensibilisation sur les pratiques durables, telles que la rotation des cultures et l'agroforesterie, contribueraient à limiter les effets négatifs. Par ailleurs, des réglementations strictes et des incitations à adopter des pratiques écologiques sont indispensables pour encadrer l'usage des pesticides et engrais. L'intensification agricole, bien qu'inévitable pour répondre à la demande alimentaire croissante, doit être gérée avec prudence afin de préserver les écosystèmes.

3.5. Analyse en Composantes Principales

A l'issue de l'ACP, les valeurs propres des composantes principales ou axes sont déterminées (Tableau 3).

Tableau 3: Valeurs propres des axes

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
Valeur propre	5,078	1,377	0,918	0,786	0,373	0,277	0,177	0,014
Variabilité (%)	56,425	15,302	10,199	8,731	4,148	3,073	1,972	0,150
% cumulé	56,425	71,727	81,926	90,657	94,805	97,878	99,850	100,000

Selon le Tableau 3, l'axe F1, avec une valeur propre de 5,078, représente 56,425 % de la variabilité totale. Cet axe est le plus explicatif et est retenu comme axe principal. L'axe F2 est aussi retenu car il a une valeur propre de 1,377, contribue à 15,302 % de la variabilité. Ces deux axes ensemble expliquent une majorité significative de la variabilité des données (71,727 %), rendant les autres axes secondaires.

La Figure 6 présente la répartition des variables actives, permettant de visualiser les contributions des différentes variables aux axes factoriels principaux obtenus lors de l'analyse en composantes principales (ACP). Cette représentation graphique illustre la manière dont les variables se répartissent dans le plan factoriel, mettant en évidence leurs associations et oppositions.

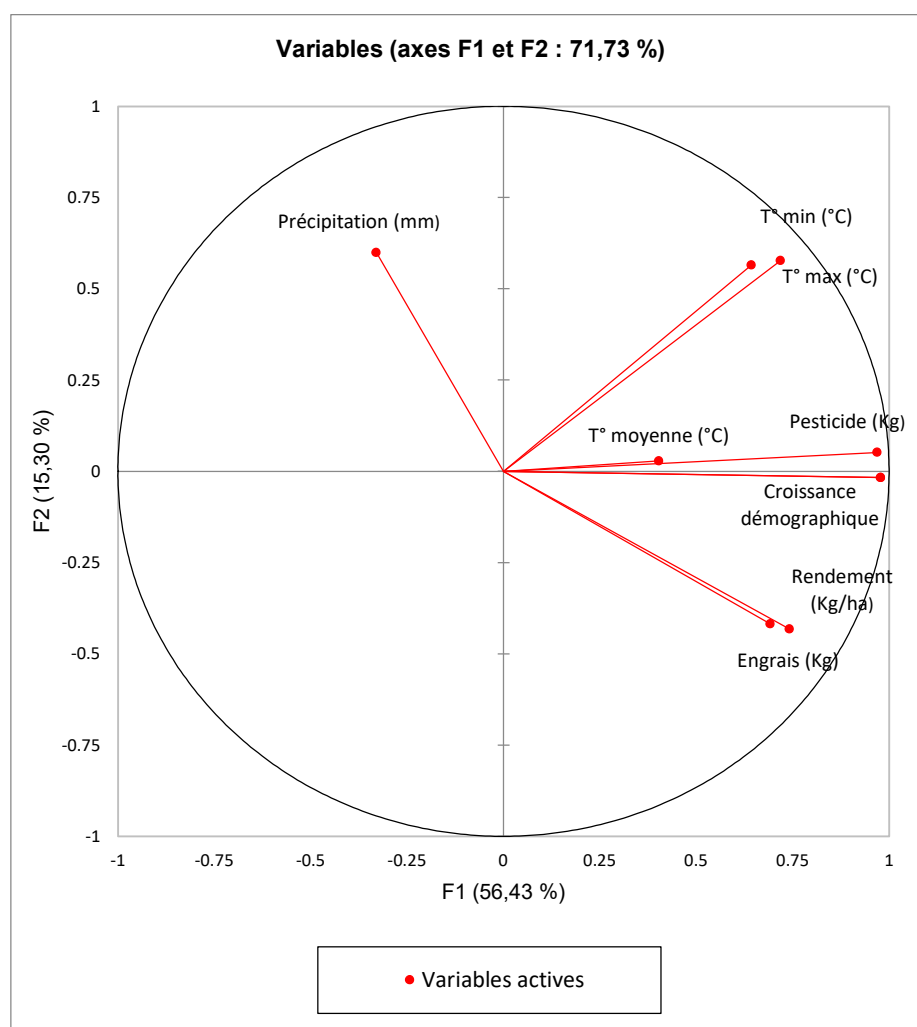


Figure 6 : Graphique des composantes principales

Les positions des variables dans la Figure 6 peuvent être interprétées comme suit :

La précipitation, presque perpendiculaire à l'axe F1, montre une faible relation avec les autres variables sur cet axe. Les températures maximale et moyenne, proches sur le graphique, sont fortement corrélées et augmentent de manière conjointe, orientées vers le haut à droite. La quantité de pesticides, également située en haut à droite, semble liée aux températures, suggérant qu'une hausse thermique pourrait entraîner une utilisation accrue, probablement en réponse à une augmentation des ravageurs. La croissance démographique, positionnée en bas à droite, paraît influencée par des dynamiques similaires à celles des pesticides. Enfin, le rendement, situé à droite, semble également avoir une relation positive avec les températures et l'utilisation d'intrants agricoles.

La Figure 7 présente la répartition des observations actives représentatives des différentes années, sur le plan factoriel défini par les deux premiers axes principaux (F1 et F2). Elle met en évidence une évolution temporelle des pratiques agricoles et climatiques. L'axe F1 illustre une opposition entre des années marquées par des variations importantes de variables, comme l'utilisation de produits chimiques ou les précipitations. Les années récentes (2019-2022) se distinguent nettement, probablement en raison de l'intensification agricole ou des variations climatiques accrues, tandis que les années anciennes (1993-2005) apparaissent plus stables. L'axe F2 reflète des fluctuations secondaires, notamment des anomalies spécifiques comme celles observées en 1999 ou 2000.

Les regroupements d'années consécutives révèlent des périodes de stabilité climatique ou agricole, tandis que le déplacement progressif sur F1 suggère une transition vers une agriculture plus intensive et réactive aux changements climatiques. Ces observations permettent d'identifier des périodes critiques (par exemple, 1999 et 2021) et de mieux comprendre l'impact des dynamiques climatiques sur les pratiques agricoles, offrant des pistes pour des stratégies d'adaptation ciblées.

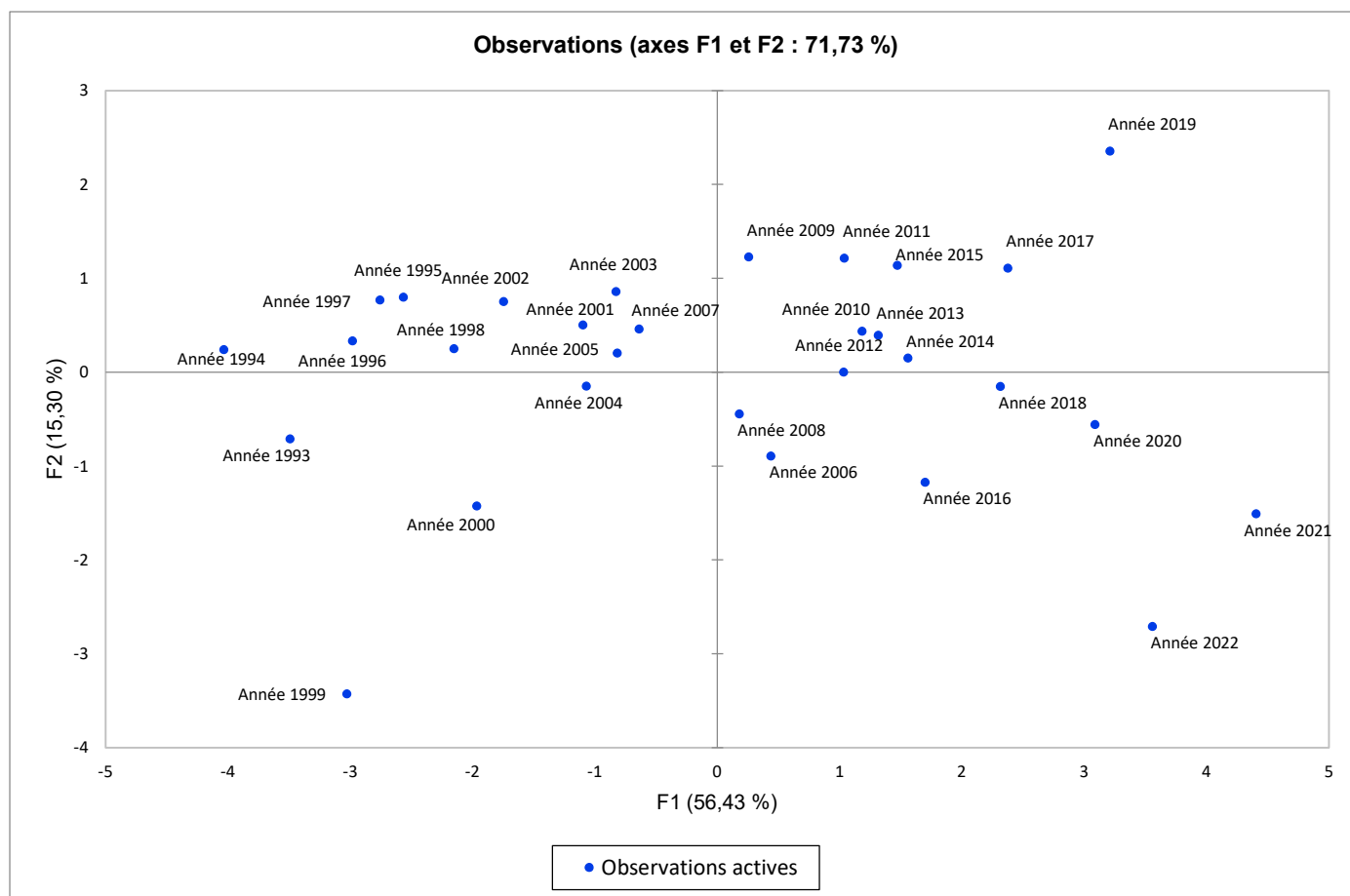


Figure 7 : Répartition des observations actives

Dans la commune rurale de Mahereza, la transition vers une agriculture chimique vise à répondre aux défis climatiques croissants, notamment les précipitations irrégulières et la hausse des températures. Cependant, cette adaptation soulève des préoccupations environnementales, comme la dégradation des sols, la pollution des eaux et l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre. Des dynamiques similaires ont été observées au Sahel, où l'usage accru d'intrants chimiques pour contrer les sécheresses a aggravé les problèmes environnementaux à long terme [22]. Altieri et Nicholls (2017) [33] recommandent des alternatives agroécologiques, qui réduisent la dépendance aux intrants chimiques tout en renforçant la résilience des systèmes agricoles.

IV. LIMITES ET PERSPECTIVES

Cette étude est limitée par la résolution des données climatiques, restreignant la précision des analyses locales et saisonnières. De plus, elle n'aborde pas en profondeur les facteurs socio-économiques influençant l'adoption des pratiques agricoles. Ces limites soulignent la nécessité de recherches futures plus intégratives.

Les recherches futures devraient s'orienter vers des études longitudinales combinant projections climatiques régionales et simulations d'adaptation pour mieux comprendre les impacts des changements climatiques. Une exploration approfondie des pratiques agroécologiques, comme l'agroforesterie et le compostage, offrirait des données et informations essentielles sur leur potentiel à renforcer la résilience agricole. En intégrant climat, agriculture et dynamiques socio-économiques, ces recherches pourront orienter efficacement politiques et pratiques pour une agriculture durable.

V. CONCLUSION

Les résultats de cette étude montrent que les variations climatiques croissantes exercent des pressions significatives sur le système agricole de la Commune rurale de Mahereza, déjà fragilisé par une dépendance accrue aux intrants chimiques. Si cette transition répond à court terme aux défis posés par l'irrégularité des précipitations et la hausse des températures, elle engendre des impacts environnementaux et économiques préoccupants à long terme, tels que la dégradation des sols, la pollution des ressources hydriques et l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre.

Pour relever ces défis, il est essentiel de promouvoir des stratégies d'adaptation durable et résiliente, notamment par le développement de pratiques agroécologiques et la gestion durable des ressources naturelles. La mise en œuvre de solutions comme l'irrigation durable, la rotation des cultures intégrant des légumineuses et la construction d'infrastructures hydriques adaptées constitue une voie prometteuse pour sécuriser les rendements agricoles tout en préservant les écosystèmes locaux.

Enfin, les limites identifiées dans cette étude ouvrent la voie à des recherches futures plus intégratives, associant données climatiques, dynamiques socio-économiques et innovation technologique. Ces travaux permettront de mieux comprendre les interactions complexes entre climat et agriculture, tout en offrant des orientations concrètes pour des politiques agricoles plus durables et adaptées au contexte de Mahereza et d'autres régions similaires.

Références

- [1] T. Farah (2023), Impact du changement climatique sur les écosystèmes agricoles et forestiers des Monts des Traras à l'aide de techniques de la géomatique - Algérie nordoccidentale, [Thèse de Doctorat], *Université Abdelhamid Ibn Badis-Mostaganem*, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
- [2] A. Bennouna (2020), Gestion de l'eau au Maroc et changement climatique, *Revue Espace Géographique et Société Marocaine*, No 32, pp 250 - 259
- [3] S. J. Richard Tol (2018), The Economic Impacts of Climate Change, *Review of Environmental Economics and Policy*, Vol. 12, No 1
- [4] J. Urry, J. (2015). Climate Change and Society, *Why the Social Sciences Matter*. Palgrave Macmillan, London. https://doi.org/10.1057/9781137269928_4
- [5] O. Adedeji, O. Reuben & O. Olatoye (2014), Global Climate Change, *Journal of Geoscience and Environment Protection*, Vol.2, No.2, <https://doi.org/10.4236/gep.2014.22016>
- [6] G. Kunte & V. Bhat (2024), Deforestation, Climate Change and the Sustainability of Agriculture: A Review, *J. of Resources and Ecology*, Vol. 15, No. 1, pp 140-150. <https://doi.org/10.5814/j.issn.1674-764x.2024.01.012>
- [7] D. Ademe, K. Tesfaye, B. Simane, B. F. Zaitchik, G. Alemayehu & E. Adgo (2024), Optimizing agronomic practices to harness climate change impacts on potato production in tropical highland regions, *European Journal of Agronomy*, Vol. 152, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.127021>
- [8] U. Sambo & B. Sule (2024), Impact of Climate Change on Food Security in Northern Nigeria, *Green and Low-Carbon Economy*, Vol. 2, No. 1, <https://doi.org/10.47852/bonviewGLCE3202560>
- [9] Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security, *Science*, Vol. 304, No. 5677, pp 1623-1627, <https://doi.org/10.1126/science.1097396>
- [10] D. Sarica & B. Y. Aydemir (2024), Chemical Fertiliser And Pesticide Usage Preferences In Avocado Production Farms: A Case Of Antalya Province, Türkiye, *Scientific Papers Series Management, Economic Engineering in Agriculture and Rural Development*, Vol. 24, No. 1, pp 845 – 855

- [11] TAFARAY (2022), Rapport Final : Capitalisation opérationnelle sur l'amélioration de l'accès et la gestion en eau, Projet PROTANA
- [12] A. F. Kienou (2009), Exemple d'un avant-projet Sommaire - Madagascar : Alimentation en eau potable, Fokontany Ambodivona, Commune Rurale Mahareza, District Ambohidratrimo, Région Analamanga
- [13] P. Samuels & M. Gilchrist (2014), Pearson Correlation, Statstutor
- [14] A. F. Siegel (2012), Chapter 14 - Time Series: Understanding Changes over Time, Practical Business Statistics (Sixth Edition), Academic Press, pp 429-464, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385208-3.00014-6>
- [15] V. Kotu & Bala Deshpande (2019), Chapter 12 - Time Series Forecasting, Data Science (Second Edition), pp 395-445, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814761-0.00012-5>
- [16] B. Salem K. & B. Abdelaziz A. (2021), Principal Component Analysis (PCA), Tunis Med, Vol. 99, No. 4, pp 383-389
- [17] S. Marukatat (2023), Tutorial on PCA and approximate PCA and approximate kernel PCA, Artificial Intelligence Review, Vol. 56, pp 5445–5477, <https://doi.org/10.1007/s10462-022-10297-z>
- [18] T. Yang, M. Ren & K. Zhou (2018), Identifying household electricity consumption patterns: A case study of Kunshan, China, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 91, pp 861-868, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.037>
- [19] A. Abedi, L. Gaudard & F. Romerio (2019), Review of major approaches to analyze vulnerability in power system, Reliability Engineering & System Safety, Vol. 183, pp 153-172, <https://doi.org/10.1016/j.res.2018.11.019>
- [20] A. I. Keskin, B. Dincer & C. Dincer (2020), Exploring the Impact of Sustainability on Corporate Financial Performance Using Discriminant Analysis, Sustainability. Vol. 12, No 6, <https://doi.org/10.3390/su12062346>
- [21] M. Alrawashdeh & T. Radwan (2017), Wilk's lambda based on robust method, AIP Conference Proceedings Vol. 1842, No 1, <https://doi.org/10.1063/1.4982870>
- [22] F. Franchi, S. Mustafa, D. Ariztegui, F. J. Chirindja, A. D. Capua, S. Hussey, J. -L. Loizeau, V. Maselli, A. Matanó, O. Olabode, F. Pasqualotto, W. Sengwei, S. Tirivarombo, A. F. Van Loon & J. -C. Comte (2024), Prolonged drought periods over the last four decades increase flood intensity in southern Africa, *Science of The Total Environment*, Vol. 924, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171489>
- [23] W. Zhang, G. Cao, X. Li, H. Zhang, C. Wang, Q. Liu, X. Chen, Z. Cui, J. Shen, R. Jiang, G. Mi, Y. Miao, F. Zhang & Z. Dou (2016), Closing yield gaps in China by empowering smallholder farmers, *Nature*, Vol. 537, pp 671–674, <https://doi.org/10.1038/nature19368>
- [24] AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023, [En ligne] <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>, consulté le 21/01/2025
- [25] D. B. Lobell, M. B. Burke, C. Tebaldi, M. D. Mastrandrea, W. P. Falcon & R. L. Naylor (2008), Prioritizing Climate Change Adaptation Needs for Food Security in 2030, *Science*, Vol. 319, No. 5863, pp 607-610, <https://doi.org/10.1126/science.1152339>
- [26] M. B. Sylla, P. M. Nikiema, P. Gibba, I. Kebe & N. A. B. Klutse (2016), Climate Change over West Africa: Recent Trends and Future Projections, In: Yaro, J., Hesselberg, J. (eds) *Adaptation to Climate Change and Variability in Rural West Africa*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-31499-0_3
- [27] A. Traoré (2022), Changement climatique et agriculture en Afrique subsaharienne. Perception des agriculteurs et impact de l'association entre une céréale et une légumineuse sur les rendements des deux espèces et leur variabilité inter-annuelle sous climat actuel et futur. Cas du sorgho et du niébé dans l'environnement soudano-sahélien, [Thèse de Doctorat], SORBONNE UNIVERSITE, École doctorale des sciences de l'environnement d'Île-de-France (ED129)
- [28] B. Sultan, P. Roudier & S. Traoré (2015). Chapitre 10. Les impacts du changement climatique sur les rendements agricoles en Afrique de l'Ouest. In R. Lalou, M. Amadou Sanni, A. Oumarou, & M. A. Soumaré (Éds.), *Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest*, pp 209-225. IRD Éditions. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.9773>
- [29] M. Hulme, R. M. Doherty, T.N.M. Ngara & M. G. New (2001), African Climate Change: 1900-2100, *Climate Reaserch*, Vol. 17, pp 145–168, <https://doi.org/10.3354/cr017145>
- [30] FAO. (2017). The future of food and agriculture – Trends and challenges. Food and Agriculture Organization of the United Nations
- [31] T.S. Jayne, S. Snapp, F. Place & N. Sitko (2019), Sustainable agricultural intensification in an era of rural transformation in Africa, *Global Food Security*, Vol. 20, pp 105-113, <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.01.008>

[32] J. Pretty & Z. P. Bharucha (2015), Integrated Pest Management for Sustainable Intensification of Agriculture in Asia and Africa, *Insects*, Vol. 6, No. 1, pp 152-182; <https://doi.org/10.3390/insects6010152>

[33] M. A. Altieri & C.I. Nicholls (2017). The adaptation and mitigation potential of traditional agriculture in a changing climate. *Climatic Change*, Vol. 140, No. 1, pp 33-45. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0909-y>